

Christian de Perthuis

Préface de Jean Jouzel

# **LE TIC-TAC DE L'HORLOGE CLIMATIQUE**



**UNE COURSE CONTRE LA MONTRE  
POUR LE CLIMAT**



VISIT...

LANZAROTE  
*Caliente*.COM

LE TIC-TAC

# **DE L'HORLOGE** **CLIMATIQUE**



*Pour Agathe, Raphaël, Phileas et Margaux.*

# SOMMAIRE

Titre

Dédicace

Préface

Introduction : - Guerre de l'opium et changement climatique

Partie I - Urgence climatique

Chapitre 1 - La dynamique de l'empilement

Chapitre 2 - L'horloge climatique

Chapitre 3 - Le temps qu'il fera

Chapitre 4 - Message bien reçu ?

Partie II - Neutralité carbone

Chapitre 5 - Les deux jambes de la neutralité carbone

Chapitre 6 - La bascule vers les renouvelables

Chapitre 7 - Les fossiles font de la résistance

Chapitre 8 - À qui profitent les gains d'efficacité énergétique ?

Chapitre 9 - Attention : carbone vivant !

Partie III - Justice climatique

Chapitre 10 - Vous avez dit justice climatique ?

Chapitre 11 - La traque du passager clandestin

Chapitre 12 - Vers une France ZEN

Conclusion - La promesse d'un monde meilleur

Annexe 1

Annexe 2 - Trois images du système énergétique en 2050

Remerciements

Du même auteur :

Notes

Copyright

# Préface

Indéniablement, la prise de conscience de la réalité du réchauffement climatique gagne aujourd'hui du terrain parmi nos concitoyens. Le ralentissement qu'il a connu dans les années 2000 – et non son arrêt comme l'ont clamé à tort les climato-sceptiques – avait semé le doute et renforcé, chez certains, l'idée que la maîtrise des émissions de gaz à effet de serre n'avait aucun caractère d'urgence. Les années récentes, les plus chaudes que notre Planète ait connues depuis 150 ans, ont contribué à changer la donne : la température moyenne augmente à peu près au rythme envisagé il y a une trentaine d'années au moment de la création du Groupe Intergouvernemental d'experts sur l'Évolution du Climat. Qui plus est, l'intensification de certains événements extrêmes, également anticipée dans ces rapports du GIEC, est désormais perceptible. C'est en particulier le cas des records de température, mais aussi de vagues de chaleur plus précoces.

Et puis, en l'espace d'une année, le GIEC a publié trois rapports spéciaux qui constituent autant d'alertes. Le premier illustre l'intérêt que nous aurions à limiter le réchauffement à 1,5 °C par rapport à la période préindustrielle, soit un demi-degré par rapport à notre décennie ; il nous met aussi face à l'immense défi que constitue cet objectif inscrit dans l'accord de Paris. Le suivant nous sensibilise à la nécessité d'une gestion durable des sols qui permette à la fois de



nourrir l'humanité et de contribuer à la lutte contre le réchauffement climatique. Le troisième met en lumière le rôle clé de l'océan et de la cryosphère dans l'évolution de notre climat, mais aussi la fragilité des écosystèmes qui y sont associés.

Élaborés par la communauté scientifique, ces rapports et ceux qui les ont précédés sont d'une rigueur et d'une qualité largement reconnues. Ils restent cependant d'un abord relativement difficile à un moment où la question climatique monte en puissance et où, légitimement, de plus en plus de personnes souhaitent de l'information qui en préserve la rigueur, mais soit d'accès plus facile. Christian de Perthuis fait partie de ces chercheurs qui jouent à la perfection ce rôle de « passeur » entre la communauté des scientifiques et tous ceux qui désirent mieux comprendre le lien entre activités humaines et réchauffement climatique. C'est pourquoi son *Tic-tac de l'horloge climatique* tombe à point nommé. Il comble un vide en répondant à une véritable demande sociale.

L'ouvrage qu'il nous propose s'appuie sur sa parfaite connaissance des rapports successifs du GIEC. Il bénéficie de l'expertise qu'il a acquise au cours de sa carrière professionnelle – j'ai le plaisir de le côtoyer au sein de la Chaire d'Économie du Climat qu'il a créée à l'Université Paris Dauphine – et des travaux des nombreux comités de haut niveau auxquels il a participé. Il est destiné à tous ceux qui, de plus en plus nombreux, désirent mieux comprendre les causes et les conséquences du réchauffement, afin de mettre en œuvre les solutions pour en limiter l'ampleur et s'y adapter de façon préventive.

Le livre de Christian de Perthuis est extrêmement bien documenté et d'une écriture remarquablement riche et fluide. Vous en apprécierez l'esprit d'ouverture et la vision très large de la question climatique qu'il nous délivre. Certes, il va plus loin sur les

thématiques dans lesquelles il s'est directement impliqué : fiscalité écologique, taxe carbone, politiques publiques, rôle clé de l'agriculture et de la forêt... Mais il prend aussi le temps d'aborder des aspects sur lesquels il est moins attendu : histoire de l'énergie et de l'environnement, neutralité carbone, justice climatique. C'est pourquoi il est l'un des ouvrages les plus complets sur la question du changement climatique.

De plus, il nous offre de très intéressantes digressions, comme celle sur la guerre de l'opium qui interpelle le lecteur dès l'introduction. Au départ, ces détours peuvent sembler hors sujet. Ils s'y intègrent pourtant à la perfection au fil de la lecture. Ils l'agrémentent et incitent surtout le lecteur à prendre du recul pour mieux réfléchir aux questions soulevées.

Enfin, je suis en phase avec l'auteur sur beaucoup des opinions qu'il met en avant. En premier lieu sur cette notion de « justice climatique » à laquelle la dernière partie de l'ouvrage est consacrée. En effet, la première conséquence du réchauffement climatique est le risque d'accroissement des inégalités entre pays riches et pays pauvres, mais aussi au sein des pays développés entre les populations qui peuvent y faire face et celles qui ne le peuvent pas. Cette prise en compte de la justice climatique par la communauté des économistes me semble constituer un pas important pour élaborer des politiques climatiques remportant l'adhésion du plus grand nombre.

Je rejoins également Christian de Perthuis dans son refus d'endosser les visions catastrophistes, dont s'emparent actuellement les collapsologues. Je le suis lorsqu'il nous prédit que la transition va s'amplifier, espoir que je partage, ou encore qu'il nous faut tourner le dos aux mirages de la toute-puissance des technologies, credo des partisans de la géo-ingénierie. Cette connivence avec l'auteur

s'ajoute aux raisons qui m'ont fait énormément apprécier la lecture du *Tic-tac de l'horloge climatique*.

**Jean Jouzel**

**Climatologue, membre de l'académie des sciences,  
médaillé d'or du CNRS (2002).**

# Introduction :

## Guerre de l'opium et changement climatique

Dans son roman *Un déluge de feu*, Amitav Ghosh nous ramène en 1839, dans le Sud de la Chine. L'empereur a décrété un blocus sur les importations d'opium et fait brûler les stocks entreposés à Canton. Un coup sévère pour les négociants britanniques, car la Chine est devenue le débouché d'une filière hautement lucrative : celle de l'opium produit au Bengale où le pavot a envahi les champs les plus fertiles, en repoussant dans les marges les cultures vivrières. Philippe Fraser est l'un de ces négociants. Il remonte la rivière de Perles vers Canton qui sera bientôt bombardée par les Anglais. Protégé par la flotte britannique, il fait des affaires, la nuit tombée, avec des contrebandiers chinois. Le trafic de drogue ne lui pose aucun problème d'ordre moral. Écoutons ses justifications :

« Blâmer les Anglais pour le commerce de l'opium était complètement absurde. La demande venait des acheteurs chinois, et si les Anglais n'y répondaient pas, d'autres y pourvoiraient. Il était futile de tenter d'obstruer la circulation d'une substance pour laquelle il existait une telle faim. Individus et nations ne pouvaient pas plus contrôler cette marchandise qu'ils ne pourraient retenir les marées de l'océan : c'était comme un phénomène naturel – une inondation. Son flot était gouverné par des lois abstraites comme celles que

M. Newton avait appliquées aux mouvements de planètes. Ces lois assuraient que l'offre égalerait la demande aussi sûrement que l'eau recherche toujours son propre niveau<sup>1</sup>. »

J'ai choisi d'introduire cet ouvrage par cette citation de Ghosh, car elle nous incite à réfléchir à la question du réchauffement climatique avec un double angle d'approche : en prenant en considération les dynamiques historiques qui transforment les structures de l'économie mondiale depuis l'enclenchement de la révolution industrielle ; en cherchant à comprendre le rôle de l'économie, et plus particulièrement celui des marchés, dans ces transformations.

La toile de fond du roman de Ghosh est la première guerre de l'opium (1839-1842). L'empereur chinois dispose d'une flotte numériquement supérieure à celle des Britanniques. Mais ces derniers utilisent les premiers navires de guerre à vapeur, ce qui va leur conférer un avantage majeur. Grâce à la même source d'énergie – le charbon –, ils accroissent simultanément sur leur île la productivité des manufactures de textiles, créent les premiers réseaux de voies ferrées, changent l'échelle de la production d'acier. La révolution industrielle est lancée. Elle va se diffuser en Europe, puis en Amérique du Nord et jusqu'à certaines îles du Pacifique : Australie et Japon. Mais pas sur le continent asiatique.

La guerre de l'opium s'est poursuivie jusqu'en 1860. Elle marqua l'apogée des empires occidentaux et la dislocation ahurissante des économies chinoises et indiennes. Un peu avant le déclenchement de la guerre de l'opium, vers 1820, la Chine et l'Inde produisaient autant de richesse que le reste du monde. Un siècle et demi plus tard, au moment du premier choc pétrolier (1973), l'Inde et la Chine ne fournissaient plus que 8 % de la richesse mondiale. Leur niveau

de vie par habitant était tombé au 15<sup>e</sup> de celui de l'Européen ou de l'Américain moyen<sup>2</sup>.

Depuis les années 1980, la croissance se redistribue rapidement entre les zones économiques, suivant un jeu de vases communicants nous rappelant que « l'eau recherche toujours son propre niveau ». Ses moteurs s'érodent en Europe et au Japon, à un moindre degré en Amérique du Nord. Mais ils s'allument dans les pays « émergents », ré-émergeants vaudrait-il mieux dire, au premier rang desquels la Chine et l'Inde. Les écarts de niveau de vie par habitant se réduisent, notamment au détriment des classes moyennes des pays développés, ces grandes perdantes de la mondialisation. Cette redistribution de la croissance imprime des trajectoires divergentes aux émissions de CO<sub>2</sub>. Les émissions agrégées des vieux pays industriels ont fortement ralenti à partir de 1980 et diminuent depuis 2005. Celles du monde émergent se sont envolées, avec quelques indices de ralentissement en Chine dans les années 2010. Si on ne rompt pas la liaison entre activité économique et émissions de CO<sub>2</sub>, celles des pays moins avancés connaîtront demain une même envolée sitôt qu'ils trouveront les moyens de hisser la majorité de leurs habitants au-dessus des seuils de pauvreté absolue. Ce phénomène de vases communicants a conduit à une accumulation sans précédent de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, qui mettent nos sociétés dans une situation d'urgence climatique : l'accélération des dérèglements climatiques est devenue inévitable sans une réduction massive et inédite des émissions anthropiques de gaz à effet de serre.

L'éclairage apporté par l'histoire économique n'est pas seulement utile pour comprendre d'où l'on vient. Il permet aussi de mieux anticiper où l'on va. Pour contenir le réchauffement climatique, il ne suffira pas d'opérer des transformations à la marge.

Il va falloir reconstruire un système énergétique en éliminant les trois sources fossiles (charbon, pétrole, gaz) qui l'approvisionnent encore à plus de 80 %. Une transformation radicale du mix énergétique, qui va à l'encontre de toutes celles opérées depuis deux siècles par nos sociétés. Comment changer aussi radicalement et aussi rapidement d'orientation ? En matière agricole et forestière, l'urgence climatique implique de réorienter les ressources pour renforcer la capacité du milieu naturel à stocker le CO<sub>2</sub> de l'atmosphère et y réduire drastiquement les rejets de méthane et de protoxyde d'azote. Des transformations qui, là encore, vont largement à rebours des schémas de développement agricole antérieurs et qui se heurtent à la complexité des structures agraires, à la difficulté d'y mobiliser du capital du fait de leurs fragilités, aux contraintes des cycles biologiques inhérentes au vivant.

Dans les deux cas, les transformations à conduire ne vont pas s'opérer de façon linéaire suivant un scénario programmé à l'avance. Elles résulteront de jeux d'acteurs, de conflits entre intérêts économiques divergents qu'il faudra résoudre, de chocs technologiques qui n'auront pas été anticipés, d'innovations sociétales dont on ne saisira la portée qu'après coup. L'urgence climatique ne nous a donné aucun talent supplémentaire pour lire l'avenir, mieux, le préprogrammer. Aussi, je n'ajouterai aucun scénario supplémentaire décrivant une trajectoire conduisant à une société bas carbone. Il y a, depuis quelques années, plutôt inflation en la matière. Je proposerai au lecteur de réfléchir aux voies à suivre pour accélérer l'action face au changement climatique, en me reposant, chaque fois que cela sera utile, sur les leçons de l'histoire. Dans cette réflexion, je privilégierai la dimension économique. C'est la deuxième raison qui m'a conduit à amorcer cet ouvrage par la citation de Ghosh.

Dans la bouche de notre négociant britannique, les lois « naturelles » du marché, aussi inexorables que celles de la gravité de Newton, justifient qu'on fasse fortune en empoisonnant ses clients. Le marché, lieu de rencontre entre l'offre et la demande, ne porte en lui-même aucune restriction d'ordre moral. Si, au lieu d'échanger de l'opium, nous échangeons des biens et services qui émettent du CO<sub>2</sub> mais nous procurent des bénéfices à court terme, ce n'est pas le marché qui va nous restreindre. Bien au contraire. Son libre fonctionnement peut donc conduire à des désastres écologiques. Jean-Baptiste Say (1767-1832), l'un des fondateurs de la théorie des marchés, a pressenti le problème, mais l'a contourné en évacuant purement et simplement la nature du champ de son économie politique : « Les richesses naturelles sont inépuisables, car, sans cela, nous ne les obtiendrions pas gratuitement. Ne pouvant être ni multipliées ni épuisées, elles ne sont pas l'objet des sciences économiques<sup>3</sup>. »

À l'ère contemporaine, aucun économiste ne raisonne plus de cette façon. Mais la manière dont on peut protéger le capital naturel, et notamment la stabilité du climat, fait l'objet de nombreux débats. Faut-il utiliser les forces du marché en incluant dans les valeurs échangées un coût du CO<sub>2</sub> qui va écarter les biens et services contribuant à la destruction du climat ? C'est l'approche en termes de prix du carbone. Elle est privilégiée par les économistes orthodoxes comme les deux Prix Nobel Jean Tirole et William Nordhaus. Faut-il limiter le rôle du marché en l'encadrant par des réglementations de plus en plus draconiennes interdisant l'usage des biens et services carbonés ? C'est l'approche par les normes qui a fort bien fonctionné dans la lutte pour la protection de la couche d'ozone, une autre problématique environnementale de type planétaire. Faut-il une intervention directe de l'État, sous forme d'un



investissement public massif et/ou d'une planification de pans entiers de l'économie ? En bref, construire une régulation alternative au marché. Cette vision gagne du terrain, tant en Europe qu'en Amérique du Nord. Elle s'accorde bien avec des opinions publiques de plus en plus sceptiques face aux discours sur les bienfaits de la mondialisation et de l'ouverture des marchés.

La vérité est que, à l'instar du reste de la société, la corporation des économistes est désemparée face aux remises en question auxquelles va nous contraindre le changement climatique. Pour agir efficacement face au réchauffement de la Planète, il faut chercher à combiner les différents instruments d'action plutôt que d'opposer sans fin les approches des uns et des autres. Mon intuition est que les économistes ont tout à perdre en se livrant à des querelles picrocholines. Ils ont tout à gagner en s'ouvrant sur d'autres disciplines pour enrichir leur approche et en effectuant des allers-retours constants entre les outils d'analyse et l'observation des faits, à commencer par les faits historiques. C'est la ligne de conduite que je m'efforce de suivre dans cet ouvrage.

Concernant l'ouverture aux autres disciplines, l'économiste n'a d'autre choix que de s'informer auprès de la communauté des scientifiques du climat. Il a à sa disposition ce formidable matériau constitué par les rapports du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). J'y ai abondamment puisé pour écrire cet ouvrage. De plus, j'ai eu la chance, depuis quelques années, de pouvoir échanger avec les représentants de la communauté française des climatologues, et particulièrement avec Jean Jouzel dont la rencontre fut déterminante pour moi. J'ai également utilisé les travaux des historiens, notamment ceux portant sur l'énergie et l'environnement. Je confesse ma grande ignorance

d'autres sciences sociales dont les apports sont pourtant importants pour construire des réponses efficaces face à l'urgence climatique.

Concernant les allers-retours avec les faits, j'ai bénéficié de ma double expérience à la « Mission climat » de la Caisse des Dépôts, puis à la Chaire Économie du Climat de l'université Paris-Dauphine, ainsi que de quelques missions conduites pour les pouvoirs publics. Celle qui m'a le plus marqué a été la présidence du Comité pour la fiscalité écologique (2013-2014). Elle m'a appris combien était fécond le dialogue entre les parties prenantes pour établir des consensus sur les diagnostics, mais combien aussi était délicat l'art de la communication avec les pouvoirs publics qui doivent rendre les arbitrages et prendre les décisions. Une illustration particulière d'un problème plus général en matière de gouvernance du changement climatique : la prise de décision se fait rarement au consensus. Dit autrement, la recherche du consensus peut conduire à différer indéfiniment des décisions qu'il faudrait pourtant prendre sans tarder.

L'une des motivations fortes pour la rédaction de cet ouvrage a été l'irruption de la question climatique dans le débat politique européen et français. Ce débat, et notamment la mobilisation de la jeunesse, nous rappelle à nos responsabilités : trente ans après le démarrage de la négociation climatique (1990 : publication du premier rapport du GIEC), les émissions mondiales de gaz à effet de serre n'ont pas commencé à refluer. Pire, il n'est pas encore certain qu'elles soient en voie de stabilisation à court terme. Cet écart entre les déclarations d'intention et la ténacité des faits donne l'impression, au mieux, que nos sociétés sont toujours en retard et, au pire, que la question climatique n'est qu'un prétexte à des palabres sans réels impacts sur la réalité. D'où des réactions de découragement qui peuvent engendrer, d'un côté, des formes de

climatoscepticisme ravageur, de l'autre, des visions catastrophistes décourageantes.

Je ne me retrouve ni dans l'une ni dans l'autre. Ma thèse est que la transition vers une société bas carbone a commencé et qu'elle va s'amplifier sous l'action de deux moteurs entrés en action. L'un est économique : la baisse phénoménale des coûts de production de l'énergie renouvelable et du stockage de l'électricité qui va radicalement modifier le paysage énergétique. Le second est sociologique : la mobilisation de forces sociales, économiques et politiques qui ne voient plus le changement climatique comme une question d'experts, mais comme une réalité dont chacun commence à mesurer les impacts dans son environnement direct. Cette mobilisation est souvent stimulée par les cobénéfices environnementaux de l'action face aux changements climatiques (baisse des pollutions locales, meilleure résilience face aux risques environnementaux).

Mais nos sociétés devront vivre avec des tensions croissantes pendant plusieurs décennies. La transition vers la société bas carbone ne sera pas un long fleuve tranquille. Le réchauffement va continuer de s'amplifier du fait du stock de gaz à effet de serre déjà accumulé dans l'atmosphère, alors même que les trajectoires d'émission vont se stabiliser, puis baisser. Le sentiment d'être en retard dans la bataille pour le climat n'est donc pas prêt de refluer. Cela porte en germe de multiples risques de nature politique. Il y a d'abord celui d'exacerbation de conflits entre États, de « guerres climatiques » comme les nomme Harald Welzer<sup>4</sup>, si la coordination internationale s'affaiblit. Ensuite, celui de la tentation de court-circuiter le débat démocratique pour obtenir plus vite des résultats. La fascination exercée par certains régimes autoritaires est inquiétante sous cet angle. Un autre danger serait qu'on cherche à

compenser les retards par des stratégies irresponsables basées sur des interventions technologiques à grande échelle modifiant le fonctionnement du système climatique. Je veux parler ici de la géo-ingénierie dont quelques options seront examinées dans l'ouvrage.

Ma conviction est qu'il faut tourner le dos aux mirages de la toute-puissance des technologies qui permettraient de domestiquer la nature. Le changement climatique est un signal nous alertant d'un dérèglement plus global des systèmes de régulation naturels provoqué par nos modes de développement. Il contribue notamment à l'accélération de la perte de biodiversité. Par effet de retour, l'affaiblissement de la biodiversité marine et terrestre réduit la capacité du puits de carbone naturel à absorber le CO<sub>2</sub> de l'atmosphère. Il faut trouver des solutions au problème climatique qui contribuent à rompre ces effets d'entraînement réciproques. C'est l'enjeu majeur de la transition agroécologique, l'autre face de la transition climatique. La véritable alternative à la géo-ingénierie.

Parmi les accélérateurs de la transition climatique, le jeu des incitations économiques, la diffusion de l'innovation bas carbone, celle d'une bonne information, la réorganisation des villes et des territoires, la mobilisation citoyenne sont des paramètres importants et plutôt bien documentés. Il en est un qui me semble majeur : la justice climatique. Le dérèglement du climat ajoute à notre monde une inégalité inacceptable. Les pays et classes sociales les plus pauvres, ceux-là même qui ont le moins contribué aux rejets atmosphériques de gaz à effet de serre, figurent parmi les plus exposés aux effets du changement climatique. Pour combattre efficacement et rapidement le changement climatique, il faut mettre au point des solutions qui contribuent à contrecarrer cette injustice initiale. Malheureusement, l'expérience montre que nombre d'instruments des politiques climatiques aggravent au contraire les

inégalités plutôt qu'elles ne les réduisent. Sur le plan international, un grand pas en avant sera fait si on parvient à s'accorder sur une définition commune du concept de justice climatique, mieux, sur ses déclinaisons opérationnelles.

Au lecteur désirant approfondir ces questions, je propose un chemin en trois étapes.

Nous démarrons la première partie par un voyage dans le temps, grâce aux historiens de l'énergie qui nous montrent la logique de l'empilement des sources d'énergie, à l'œuvre depuis bientôt deux siècles. L'enjeu de la transition énergétique est d'abandonner cette logique en renonçant à utiliser l'énergie fossile bien avant que la rareté des stocks en terre ne nous y oblige. Les aiguilles de l'horloge climatique nous indiquent que le temps disponible pour opérer cette rupture est des plus limités. Dans tous les scénarios, les impacts du réchauffement seront difficiles à gérer. Il convient de les anticiper, par des stratégies d'adaptation visant à accroître la résilience de nos sociétés face à la perturbation climatique. Ces stratégies sont le meilleur antidote face aux postures de déni impulsées par le climatoscepticisme encore terriblement présent.

La deuxième partie propose une analyse des transformations à engager pour viser la neutralité carbone. Cet objectif, mentionné dès le début de l'accord de Paris, vise à recréer un fonctionnement circulaire du cycle du carbone dans lequel nos émissions résiduelles seront absorbées par les puits de carbone. Nous chercherons à mettre en relief les mécanismes économiques qui contrarient ou accélèrent la transition climatique. Cette transition marche sur deux jambes : la transformation du système énergétique, analysée dans trois chapitres, est souvent la mieux connue. La transformation des systèmes agricoles et forestiers est ensuite passée en revue. Elle

devra jouer un rôle majeur dans le renforcement des puits de carbone anthropiques et le maintien de la diversité du milieu naturel.

La troisième partie s'interroge sur les voies qui permettraient à nos sociétés d'accélérer la transition climatique. Elle est construite à partir du concept de justice climatique auquel nous tentons de donner un contour rigoureux sur le plan économique. Nous l'appliquons ensuite aux instruments économiques à mettre en œuvre dans le cadre de la négociation internationale sur le climat. Nous terminons par la revue de la situation française où le climat s'est immiscé au cœur du débat national avec, d'un côté, la fronde des gilets jaunes contre la taxation écologique, de l'autre, un mouvement sans précédent de citoyens poursuivant l'État devant les tribunaux pour cause d'injustice climatique.

Au terme de ce cheminement, je m'interroge en conclusion sur les caractéristiques de la société bas carbone vers laquelle nous nous dirigeons. Le modèle capitaliste basé sur l'extraction de l'énergie fossile et la généralisation des modèles productivistes agricoles a vécu. Mais quel sera le modèle qui le supplantera ? Un capitalisme d'État à la chinoise où les modes de vie sont téléguidés depuis un centre tout-puissant ? L'univers numérisé des entrepreneurs transhumanistes de la new tech californienne où le lien avec les machines intelligentes a évincé les relations humaines ? Un monde alternatif fondé sur l'inclusion et un rapport nouveau à la nature préfiguré par tant d'innovations sociétales dans la gestion des territoires ?

Pour nous apporter un éclairage sur ces questions, j'aimerais revenir à la citation de Ghosh. Nous avons embarqué sur la rivière de Perles où se déroula un horrible conflit provoqué par le commerce d'un poison qui détruisit de nombreuses vies humaines et contribua à déstructurer l'une des plus anciennes civilisations du

monde. Un siècle et demi plus tard, une grande redistribution des forces économiques est à l'œuvre. Un puissant reflux dirige la richesse vers les perdants d'hier, avec toute la force de l'eau « à la recherche de son propre niveau ». Ce monde est parcouru de multiples tensions. Nous venions à peine d'enterrer la guerre froide que rejaillit un conflit commercial sans pareil entre les États-Unis et la Chine. Je suis frappé par le fait que cette confrontation fait passer au second plan la question climatique. Elle était, voici quelques années, omniprésente dans les relations entre les deux superpuissances. Lorsque les dirigeants de ce monde s'empoignent, la protection du climat disparaît des agendas. Lorsque le climat réapparaît, les tensions sont moindres. C'est le signe que la prise en compte du changement climatique ne répond pas seulement à la nécessité de préserver un monde viable. Elle est aussi la promesse d'un monde meilleur.

## PARTIE I

# URGENCE CLIMATIQUE

Dans la préface à l'édition française de sa magistrale histoire de l'environnement mondial, John McNeill revient sur le principal enseignement tiré de plusieurs décennies de recherche historique :

« Lorsque j'ai commencé à travailler sur ce livre au début des années 1990, je pensais que l'élément qui avait le plus fortement marqué l'histoire environnementale mondiale du <sup>xx</sup><sup>e</sup> siècle avait été l'accroissement de la population. Lorsque j'eus achevé ce travail, mon opinion avait changé, et c'est le système énergétique basé sur les énergies fossiles que je considérais comme la variable essentielle ; j'ai tâché de souligner son importance dans le livre. Je pense maintenant, dix ans plus tard, que si c'était à refaire, j'insisterais encore plus sur les énergies fossiles<sup>1</sup>. »

Les chiffres parlent d'eux-mêmes<sup>2</sup>. La Terre hébergeait un peu plus de 6 milliards d'habitants en 2000, contre 1,65 en 1900 et 900 millions en 1800 (environ 400 millions en 1500). L'accélération est spectaculaire. Celle de la consommation d'énergie tirée par l'usage de nouvelles sources fossiles est encore plus marquée : une multiplication par deux au <sup>xix</sup><sup>e</sup> siècle et par neuf au <sup>xx</sup><sup>e</sup> siècle. L'utilisation massive d'énergie a profondément modifié les conditions de vie de l'espèce humaine en favorisant la baisse drastique de la



mortalité et l'allongement de l'espérance de vie. Elle a simultanément provoqué de multiples atteintes locales ou régionales à l'environnement. Sur le plan global, elle a par ses rejets croissants de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère déclenché le réchauffement de la Planète.

Au <sup>e</sup>xxi<sup>e</sup> siècle, la croissance de la population devrait fortement décélérer, nous disent les démographes : sa vitesse maximale a été atteinte à la fin des années 1960. Suivant le schéma bien connu de la transition démographique, sa décélération devrait se prolonger pour tendre vers un régime de stabilité quelque part vers la fin du siècle<sup>3</sup>. Comme au siècle précédent, c'est la place des énergies fossiles dans le système énergétique qui restera la variable majeure pour l'environnement. Ce siècle va connaître un reflux massif des énergies fossiles. Cette « transition énergétique », suivant l'expression consacrée, vient à peine de commencer. Mais elle est loin de nous prémunir contre les risques du réchauffement de la Planète, nous expliquent les climatologues. Car le temps est compté. Les aiguilles se sont emballées sur le grand cadran de l'horloge climatique.

Nous abordons cette partie en écoutant les historiens de la transition énergétique. Depuis deux siècles, les sociétés humaines empilent de nouvelles sources d'énergie fossile en repoussant le spectre de la rareté. Cette dynamique de l'empilement a permis de disposer de beaucoup plus d'énergie tout en provoquant une excroissance du stock de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère, le principal gaz à effet de serre d'origine anthropique. Mais les gisements d'énergie fossile ne sont pas renouvelables. La transition vers un système énergétique débarrassé des fossiles n'est qu'une question de temps. Pour contenir le réchauffement global, il faut renoncer à l'utilisation des fossiles bien plus rapidement que ce à quoi nous contraindrait la

raréfaction des stocks en terre. Un virage à 180° auquel nos sociétés, organisées selon la logique du toujours plus, sont très mal préparées ([chapitre 1](#)).

En extrayant de la croute terrestre une énergie initialement contenue dans de la biomasse que la nature a mis plusieurs centaines de millions d'années à fossiliser, l'homme a court-circuité le temps géologique. Il est entré dans l'ère de l'Anthropocène : ses rejets de gaz à effet de serre dans l'atmosphère sont devenus le déterminant principal des changements climatiques. Nous nous mettons ensuite à l'écoute des climatologues. Compte tenu du stock déjà relâché dans l'atmosphère, atténuer le réchauffement devient une course contre la montre. Les aiguilles de l'horloge climatique se sont emballées. Le tic-tac de l'horloge nous laisse au mieux quelques décennies pour contenir le réchauffement moyen en deçà de 2 °C ([chapitre 2](#)).

Les impacts du réchauffement se multiplient et vont s'amplifier pendant les prochaines décennies. Au-delà, leur ampleur dépendra de la vitesse à laquelle aura été conduite la transition bas carbone. Ces impacts heurtent en premier lieu les pays pauvres, les moins responsables du réchauffement et, au sein des pays riches, les classes sociales défavorisées. Les stratégies d'adaptation au changement climatique visent à accroître la résilience des sociétés face au réchauffement. La pauvreté est un facteur de vulnérabilité, mais aussi l'hypersophistication des sociétés modernes. Les stratégies d'adaptation peuvent réduire le coût futur des dommages, mais constituent aussi un levier de mobilisation des citoyens et des territoires ([chapitre 3](#)).

Malgré une information scientifique sans équivalent, désormais largement médiatisée, les sociétés restent ambivalentes face à la question climatique. Le climat, plus généralement l'écologie, s'est

imposé dans le débat politique et mobilise les jeunes générations. Le doute sur le caractère anthropique du changement climatique n'a pas disparu pour autant. Il est revendiqué par la plupart des leaders populistes qui ont plutôt le vent en poupe. Il stimule, en réaction, le catastrophisme et parfois la radicalisation. Nous clôturons cette partie en nous interrogeant sur les raisons du décalage entre la clarté du message des scientifiques et la difficulté des sociétés à l'intégrer dans la prise de décision ([chapitre 4](#)).

## CHAPITRE 1

# LA DYNAMIQUE DE L'EMPILEMENT

La population de l'île de Ré, située sur le littoral atlantique, décuple à la saison estivale. Parmi les activités incontournables des vacanciers : la visite du phare des Baleines qui se dresse à 57 m au-dessus de la pointe de l'île. Le monument offre un point de vue sans pareil. Il constitue également une mémoire des transitions énergétiques du passé. Nous entamerons ce chapitre par l'ascension des 257 marches conduisant à son sommet. La visite constitue une excellente initiation à l'étude des transitions énergétiques du passé.

Les historiens de l'énergie nous éclairent sur les transformations des systèmes énergétiques dont la dynamique a jusqu'à présent répondu à la logique de l'empilement : de nouvelles sources d'énergie viennent s'ajouter à celles préexistantes, sans s'y substituer. Ce mouvement a été amorcé voici très longtemps avec la maîtrise du feu, l'introduction de la traction animale puis l'utilisation du vent et de l'eau pour gonfler les voiles et faire tourner les moulins. Il connaît une accélération sans précédent depuis deux siècles. La mobilisation des sources fossiles – le charbon, le pétrole puis le gaz – permet un accroissement, inédit dans l'histoire humaine, de la consommation d'énergie et une démultiplication de ses usages. Les

forces du marché y contribuent via la baisse séculaire du prix réel de l'énergie. Des systèmes énergétiques complexes, pleins d'inerties, supportent désormais nos sociétés.

### **Figure 1.1 Les phares, mémoires des transitions énergétiques**



*À gauche sur la photo, la tour des Baleines, l'un des multiples héritages de Vauban, a fonctionné à l'huile de poisson avant de passer au charbon. La tour fut remplacée en 1854 par l'actuel phare des baleines, à droite sur la photo, mis en service en 1854 et raccordé au réseau électrique au début des années 1950.*

Source : <https://www.iledere.com/>

À l'empilement de nouvelles sources d'énergie a répondu un accroissement sans pareil des émissions anthropiques de CO<sub>2</sub>, le principal gaz à effet de serre généré par l'activité humaine. Cet accroissement peut être analysé suivant les dimensions temporelles et spatiales. La première révèle une accélération incessante des émissions depuis deux siècles. La seconde nous montre une

redistribution de la géographie des émissions, à mesure que la mondialisation de l'économie diffuse des modes de production et de consommation gourmands en énergie et émetteurs de CO<sub>2</sub>.

Rompre avec la logique de l'empilement sera la grande affaire de la prochaine mutation du système énergétique : la transition bas carbone. Une transition dont nous montrons à la fin du chapitre combien elle va constituer un virage à 180° pour nos sociétés. Pour l'opérer avec succès, il faudra tenir compte de la complexité et de l'inertie des systèmes énergétiques que met en relief l'approche historique proposée dans ce premier chapitre.

## **UNE VISITE AU PHARE DES BALEINES**

L'étymologie du mot phare renvoie au grec « Pharos », du nom de l'île où s'élevait le célèbre phare d'Alexandrie, disparu il y a plus de 700 ans. Pendant longtemps, les phares ont joué un rôle crucial pour guider les navires s'approchant des ports. Cette fonction stratégique a été perdue avec la généralisation du guidage assisté par satellites. La plupart des phares français sont aujourd'hui classés monuments historiques. La nuit venue, leurs rayons continuent de balayer la surface de l'océan pour notre plaisir. Les phares constituent également une mémoire passionnante des transitions énergétiques du passé.

L'histoire du phare des Baleines démarre sous Louis XIV. La construction de la tour des Baleines, située entre l'actuel phare et le littoral, fut commandée par Colbert, alors secrétaire d'État de la Marine, et achevée en 1682 sous la supervision de Vauban. L'emplacement fut retenu pour sa proximité avec le port de La Rochelle, alors l'un des tout premiers du royaume, et qui le resta pendant deux siècles<sup>1</sup>.

Commençons par examiner les sources d'énergie mobilisées. La tour brûlait à l'origine de l'huile de poisson et de baleine dont le rendement en termes d'éclairage était faible et dont l'efficacité était gênée par la tendance de la combustion à calciner les vitres de la lanterne. L'huile de baleine était le combustible favori si bien que les besoins de l'éclairage dans le monde accélérèrent dangereusement la chasse de ce mammifère marin aujourd'hui (imparfaitement) protégé.

Dès 1736, le charbon fut substitué à l'huile de baleine comme combustible. Il était brûlé dans un réchaud surmonté d'un dôme permettant de réfléchir la lumière. Ce changement permit d'améliorer le rendement d'éclairage, mais nécessitait d'acheminer des quantités importantes de houille. Les archives du phare de Cordouan, situé à l'embouchure de la Gironde, révèlent que les gardiens de ce type de phare devaient quotidiennement tracter de 100 à 150 kg de charbon au sommet du phare pour alimenter le feu. C'est pourquoi le charbon fut par la suite remplacé par le pétrole lampant, avant de basculer à l'électricité au début du xx<sup>e</sup> siècle.

Le passage de l'huile de baleine au charbon permit d'améliorer la puissance d'éclairage. À masse équivalente, le pouvoir calorifique du charbon, c'est-à-dire la quantité d'énergie produite lors de sa combustion, est en effet bien supérieur à celui de l'huile de baleine. Celui du pétrole ensuite substitué au charbon améliora encore l'efficacité de la source d'énergie utilisée.

La mobilisation de sources primaires au contenu énergétique de plus en plus dense est l'une des caractéristiques majeures des transitions énergétiques analysées par Vaclav Smil dans son ouvrage de référence sur la question<sup>2</sup>. À partir d'une approche historique, l'auteur montre que cette densification a conduit au niveau mondial à un accroissement sans précédent de la

consommation d'énergie et des émissions de CO<sub>2</sub> d'origine fossile. Premier enseignement, très utile pour l'analyse des transitions énergétiques.

Examinons maintenant les techniques utilisées pour convertir les sources d'énergie en usages utiles pour l'utilisateur. À l'amélioration des sources d'énergie alimentant le phare se sont ajoutées les innovations dans les techniques de transformation de l'énergie en lumière, d'abord grâce à l'invention par l'ingénieur français Augustin Fresnel (1822) de la lentille à échelons, puis grâce aux ampoules électriques dont Joseph Swann (1878) et Thomas Edison (1879) se disputèrent la paternité.

L'ancienne tour des Baleines, d'une portée jugée insuffisante, fut remplacée en 1854 par l'actuel phare d'une hauteur deux fois supérieure. Il fut l'un des premiers à bénéficier du dispositif de lentille de Fresnel, toujours en service actuellement, lui permettant d'atteindre une portée d'environ 50 km. En 1904, une centrale de production d'électricité à vapeur remplaça les systèmes antérieurs de combustion. Le raccordement du phare des Baleines au réseau électrique n'intervint que dans les années 1950. Avec l'électricité, la portée du phare fut à nouveau démultipliée grâce à l'efficacité inégalée des ampoules pour transformer l'énergie en lumière.

Les progrès techniques réalisés dans la conversion de l'énergie en lumière furent plus déterminants pour accroître la portée du phare que l'accroissement de la quantité et de la qualité de l'énergie primaire utilisée. On retrouve ici les observations de Roger Fouquet et Peter Pearson<sup>3</sup> sur le rôle déterminant des gains d'efficacité énergétique dans la baisse des coûts de l'éclairage au cours des deux siècles passés. Second enseignement, plus général, pour la compréhension des transitions énergétiques : autant que le mix des sources énergétiques sur lequel se focalisent souvent les débats, la



chaîne de transformation de ces sources en usages finaux constitue un maillon déterminant des systèmes énergétiques et de leurs transformations.

En reprenant l'escalier hélicoïdal qui nous ramène à terre, nous sommes pris d'un certain vertige. Nous nous interrogeons sur le lien entre le fonctionnement du phare et les émissions de CO<sub>2</sub>. Du temps de l'huile de baleine ou du charbon, on identifiait directement les émissions au moment de leur combustion. Avec le raccordement au réseau électrique, l'affaire devint plus compliquée, car les émissions dépendaient désormais du type de centrale alimentant le réseau. Sans compter que les navires entrant dans le port étaient eux-mêmes devenus émetteurs de CO<sub>2</sub> du fait de leurs nouveaux systèmes de propulsion (vapeur puis moteurs diesel). L'amélioration de la performance des phares, plus généralement des techniques de guidage des navires, rendit possible l'accroissement du trafic maritime. Par l'augmentation des usages qu'elle favorisa, elle contribua aussi aux émissions de gaz à effet de serre.

Troisième enseignement de notre visite : ne pas sous-estimer le rôle des usages finaux dans la transformation des systèmes énergétiques. Une dimension restée longtemps bien trop absente des politiques énergétiques.

Avant de quitter les lieux, retournons-nous afin d'admirer une dernière fois ce qui est devenu une curiosité touristique. Le basculement du guidage des navires depuis les phares vers les satellites a-t-il réduit les besoins en énergie fossile et par voie de conséquence les émissions de CO<sub>2</sub> ?

C'est probablement l'inverse : l'énergie primaire utilisée par les technologies de l'information n'est pas directement visible comme l'étaient l'huile de baleine ou le charbon hissé au sommet des anciens phares. Mais elle est élevée, car l'imagerie satellite implique

toute une infrastructure consommatrice d'énergie, notamment pour alimenter et refroidir les serveurs. Surtout, le guidage par satellite permet de multiplier les usages finaux et contribue à la croissance très rapide de la navigation maritime : l'une des sources d'émission de CO<sub>2</sub> qui augmente le plus rapidement dans le monde depuis trois décennies. La mise en retraite des phares, aussi bien que leur vie active, est pleine d'enseignements pour la compréhension des transitions énergétiques !

## **VOUS AVEZ DIT « TRANSITION ÉNERGÉTIQUE » ?**

Le concept de « transition énergétique » est apparu furtivement au lendemain des chocs pétroliers des années 1970, dans des ouvrages ou rapports portant sur la diversification du mix énergétique<sup>4</sup>. Son usage a reflué dans les années 1980, à la suite du contrechoc pétrolier. L'expression est revenue en vogue dans les années 2000 avec la remontée des prix des énergies et la prise de conscience de la question climatique.

Depuis quelques années, le terme s'est banalisé. Il est de plus en plus manié au singulier, comme par exemple dans l'intitulé de la « Loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte », votée par le Parlement français en 2015<sup>5</sup>. Avec un certain flou sémantique, le qualificatif « écologique » se substitue parfois au terme « énergétique », ce qui ne contribue guère à la clarification du concept.

L'expression devrait plutôt se décliner au pluriel, car elle peut justifier des stratégies très diverses. Aux États-Unis, la transition énergétique vise à réduire la dépendance du pays à l'égard des importations d'hydrocarbures. Le terme justifie le déploiement à grande échelle des pétroles et gaz de schiste qui risquent de

prolonger l'usage des énergies fossiles<sup>6</sup>. Au Proche-Orient, la transition énergétique doit permettre de guérir les économies de leur addiction à la rente pétrolière. Dans les pays émergents, elle vise à assurer un accroissement des sources d'énergie compatible avec la montée en régime des économies.

En Europe, le concept justifie sur le papier des politiques visant simultanément à réduire les émissions de gaz à effet de serre, à promouvoir les énergies renouvelables et à inciter à l'efficacité énergétique. Mais sitôt que l'on creuse un peu, il apparaît que l'emballage enveloppe des stratégies nationales disparates : au nom de la transition énergétique, l'Allemagne quitte le nucléaire, le Royaume-Uni cherche à y revenir, la Pologne à y entrer et la France s'interroge sur les moyens de réduire son poids...

Cette malléabilité du concept est dangereuse, car elle peut orienter vers des futurs indésirables sous l'angle du climat. Tentons de le définir plus rigoureusement à partir des travaux des historiens de l'énergie.

La notion de transition énergétique est souvent définie à partir du poids respectif des sources primaires d'énergie utilisées dans le système, communément appelé « mix énergétique ». Par exemple, le système énergétique mondial est passé de la domination de la biomasse traditionnelle à celle des fossiles durant la seconde moitié du XIX<sup>e</sup> siècle du fait de la contribution croissante du charbon qui représentait 7 % de l'énergie primaire utilisée dans le monde en 1850, mais 47 % en 1900 et 55 % en 1910. On peut également appliquer ce filtre d'analyse à un segment isolé du système énergétique : le système électrique français a ainsi transité en une trentaine d'années des fossiles vers le nucléaire à la fin du siècle dernier.

On associe souvent cette définition à un critère de temps requis pour qu'une nouvelle source primaire atteigne un certain poids dans le système, comme l'ont initié Marchetti et Nakicenovic (1979)<sup>7</sup> dans une approche assez déterministe. Ainsi, Smil (2017) observe qu'il a fallu plus de 100 ans pour que le charbon contribue à hauteur de 25 % à l'approvisionnement mondial en énergie, alors que le pétrole a atteint ce chiffre en 80 ans. Des délais assez longs, également soulignés par Peter Lund (2006)<sup>8</sup>. Cette approche repose cependant sur la datation des points de départ et d'arrivée dont le caractère conventionnel mérite d'être discuté, comme le rappelle Benjamin Sovacool (2017)<sup>9</sup>.

L'approche à partir du mix énergétique est cependant loin de fournir toutes les clés pour appréhender les transitions énergétiques. Pour comprendre la dynamique des systèmes énergétiques, il convient d'en avoir une représentation complète.

## **DES SYSTÈMES À INTERRELATIONS MULTIPLES**

Un système énergétique se caractérise par un jeu d'interrelations qui rattachent les sources primaires aux usages finaux.

Les usages finaux de l'énergie correspondent à la consommation d'énergie par les ménages, les entreprises ou les collectivités. Ces usages répondent à de multiples besoins, de déplacement, de chauffage, d'éclairage, de fabrication... nécessaires à l'activité humaine. Il y a donc une corrélation entre les modes de production et de consommation d'une société et la quantité d'énergie finale qu'elle consomme. Les usages finaux peuvent être associés à des technologies qui reposent durablement sur telle ou telle énergie. L'invention du moteur à combustion interne dans les années 1880 a

ainsi conditionné l'expansion de l'industrie automobile mondiale et celle induite des produits pétroliers.

En amont des usages finaux fonctionne toute une chaîne d'équipements et d'infrastructures permettant de transformer l'énergie, de la stocker et de la transporter jusqu'au consommateur. Ces maillons centraux jouent un rôle majeur dans le fonctionnement des systèmes énergétiques : sans l'invention de la machine à vapeur par Watt (1769), le charbon n'aurait pas eu l'essor qu'il a connu au XIX<sup>e</sup> siècle ; sans celle de la turbine par Fourneyron (1832), l'électricité n'aurait pas joué le rôle qui a été le sien au XX<sup>e</sup> siècle.

Les sources primaires composent le mix énergétique du système. Pour le mesurer, il faut ramener la quantité d'énergie utilisée par les consommateurs finaux en une unité énergétique commune. Une telle opération pose des problèmes de conversion, ce qui exige des conventions qui peuvent aboutir à des résultats assez différents concernant le positionnement du secteur électrique dans le système<sup>10</sup>.

On peut maintenant caractériser avec plus de rigueur le concept de transition énergétique, défini comme l'« ensemble des transformations requises pour modifier significativement les usages finaux, le mix des sources primaires et la chaîne de transformation/stockage/distribution d'un système énergétique ». Une telle vision systémique est à la base des travaux d'auteurs comme Smil ou Fouquet. Elle a également été popularisée par l'ouvrage de l'essayiste Jeremy Rifkin sur la « troisième révolution industrielle<sup>11</sup> ».

Comme le montre l'analyse historique, ce type de transformation touchant aussi bien le mix des sources primaires que les usages finaux et les maillons intermédiaires de la chaîne s'étale sur de longues périodes. Son rythme se heurte notamment à l'inertie des

infrastructures matérielles et immatérielles sur lesquelles repose le fonctionnement du système.

Le concept de transition énergétique peut se décliner par secteur, comme l'ont par exemple fait Fouquet (2010)<sup>12</sup>, et par zone géographique. En analysant les transitions opérées à des échelles régionales et sectorielles, Sovacool (2017) nuance le constat fait par les historiens de l'énergie d'une très grande inertie des systèmes énergétiques et notamment de la durée qui sépare généralement le moment où apparaissent les innovations techniques de celui où elles produisent leurs transformations structurelles. Pertinentes sur certains sous-segments du système énergétique, ces observations peuvent difficilement être extrapolées à l'échelle globale. Or, c'est cette échelle qui importe pour l'économiste du climat. En s'inspirant de Smil, on peut repérer quatre transitions énergétiques ayant marqué l'histoire des sociétés.

## **QUATRE TRANSITIONS SÉCULAIRES**

La première est la domestication du feu qui intervint probablement il y a 400 000 ans<sup>13</sup>. Elle permit à l'espèce humaine de prendre un avantage déterminant sur ses concurrentes. L'utilisation du feu pour la cuisson et le chauffage améliora grandement la capacité de l'homme à transformer la biomasse, unique source primaire, en énergie musculaire. En éloignant les fauves, le feu facilita la défense de l'espèce contre ses prédateurs. Il permit également d'améliorer les instruments en bois, notamment l'affutage des pieux, et favorisa les migrations vers les régions froides. Bien plus tard, le feu permit de fondre des métaux. Ce nouvel usage final joua un rôle majeur dans l'histoire de notre

espèce : il permit de passer de l'âge de la pierre à celui des métaux, 8 à 10 000 ans avant notre ère.

La deuxième transition énergétique fut liée aux progrès de l'agriculture et de l'élevage. Ses premières traces se trouvent dans le « croissant fertile » de la Mésopotamie à partir du troisième millénaire avant notre ère. Les Sumériens parvinrent, grâce à l'irrigation, à y accroître les rendements des cultures pour nourrir des animaux domestiques et sédentariser les hommes. L'écriture, les premières organisations urbaines, l'ancêtre de nos codes juridiques y virent le jour. À la suite de Samuel Noah Kramer, on peut donc considérer que l'histoire humaine moderne « commence à Sumer<sup>14</sup> ». Sur le plan énergétique, la révolution consista à ajouter la traction animale à la force musculaire des hommes. La source primaire demeurait la biomasse, mais le rendement de sa transformation fut démultiplié : pour le labour d'un champ ou le transport de la récolte, le rendement fut multiplié par un facteur 4 à 6.

Les deux premières transitions énergétiques ne reposèrent donc pas sur l'adjonction de nouvelles sources primaires dans le système énergétique. Elles résultèrent des progrès dans la capacité des hommes à convertir une source unique, la biomasse, en énergie utile.

À partir du <sup>xv</sup>e siècle, le vent et la force des rivières apportèrent des appoints croissants au système énergétique. Le souffle du vent dans les voiles autorisa les progrès de la navigation à l'origine des grandes découvertes puis du commerce au long cours. Nouvelle source à laquelle s'ajouta à terre le captage de la force des courants par les moulins qui stimula le développement d'activités nouvelles, à la frontière de l'artisanat et de l'industrie : tanneries, ateliers de tissage, ferronneries, meuneries, savonneries, etc. se multiplient le

long des rivières. Ces sources d'appoint contribuèrent au lent décollage de la démographie. Du début de la Renaissance à la fin du siècle des Lumières, la population mondiale passe d'un peu plus de 400 000 habitants à 900 000, alors qu'elle n'avait guère augmenté depuis le début de notre ère. Mais ces mutations ne constituent pas des ruptures comparables à celles qui interviendront avec le développement à grande échelle d'une nouvelle source : le charbon.

Utilisé depuis longtemps à des fins de chauffage au Royaume-Uni, le charbon connut un développement dans le Nord de la Chine, sous la dynastie des Song (960-1279) avec l'ébauche d'une industrie qui culmina au <sup>x</sup><sup>e</sup> siècle pour ensuite péricliter<sup>15</sup>. La troisième transition énergétique ne s'amorce véritablement au Royaume-Uni qu'à la fin du <sup>xviii</sup><sup>e</sup> siècle pour se diffuser rapidement au siècle suivant en Europe et en Amérique du Nord. Elle va démultiplier la quantité d'énergie utilisée grâce à l'extraction massive du charbon qui supprime le bois et la force musculaire des hommes et des animaux domestiques vers 1900, et s'impose comme la première source d'énergie dans le monde jusqu'au milieu des années 1960 ([annexe 1](#)). Souvent présenté comme l'énergie du <sup>xix</sup><sup>e</sup> siècle, le charbon ne prend pourtant une place significative dans le système énergétique mondial qu'à partir de 1880. Les innovations à l'origine de son usage étaient disponibles dès le milieu du <sup>xviii</sup><sup>e</sup> siècle. Environ 150 ans séparent donc l'innovation technique de sa diffusion massive qui va transformer le système économique.

La quatrième transition énergétique repose sur une grappe d'innovations qui apparaissent simultanément durant les deux dernières décennies du <sup>xix</sup><sup>e</sup> siècle et permettent la mobilisation de l'électricité (génération, transport, usage dans l'éclairage puis l'industrie) et la mise au point du moteur à combustion interne



fonctionnant à l'essence ou au diesel. On reconnaît là deux des trois innovations techniques majeures identifiées par l'économiste Robert Gordon (2000<sup>16</sup>, 2012<sup>17</sup>) dans son analyse du processus de croissance. De fait, la diffusion de ces innovations est à la source des vagues de croissance successives durant le xx<sup>e</sup> siècle. De multiples biens allaient suivre, de la machine à laver (premiers modèles disponibles en 1907 aux États-Unis) à l'ordinateur et à tous les engins qui nous permettent de nous transporter. Leur accumulation a permis de bousculer les modes de vie et de créer les conditions d'une consommation de masse, limitée aux pays industrialisés jusqu'en 1950, s'élargissant ensuite aux pays émergents par vagues successives. Ici encore, de longues décennies séparent l'apparition des innovations techniques, intervenues pour la plupart avant 1900, et leur impact sur la croissance qui ne se manifeste pleinement qu'à partir de 1950.

## **L'EMPILEMENT DES SOURCES D'ÉNERGIE**

Une caractéristique commune des transitions énergétiques de l'époque moderne est d'avoir reproduit un schéma additif dans lequel de nouvelles sources primaires viennent s'ajouter à celles préexistantes, sans s'y substituer. Christophe Bonneuil et Jean-Baptiste Fresco parlent joliment d'une « histoire d'addition<sup>18</sup> ». C'est la raison pour laquelle le monde n'a jamais consommé autant de charbon, l'« énergie du xix<sup>e</sup> siècle », que depuis l'an 2000 ([annexe 1](#)). Ce schéma additif contraste avec la vision des transitions énergétiques développée par Marchetti et Nakicenovic (1979). Ces auteurs ont construit un modèle dans lequel le passage d'une énergie dominante à l'autre s'opère suivant une logique substitutive. Cette représentation stylisée est éloignée de

l'observation des faits : les transitions énergétiques opérées depuis le début de la révolution industrielle reposent sur un empilement des sources fossiles dans une logique strictement additive.

Une seconde caractéristique associée au mécanisme d'empilement concerne la densité énergétique croissante des sources mobilisées : à volume équivalent, le pétrole fournit plus d'énergie que le charbon qui, lui-même, en produit plus que le bois. Les densités énergétiques peuvent également se ramener à l'unité de surface. On constate dès lors que l'avènement des sources fossiles a permis aux sociétés humaines de produire de plus en plus d'énergie par unité de surface. D'après un calcul de Smil, l'ensemble des infrastructures supportant l'approvisionnement mondial en énergie fossile couvrirait une superficie équivalente à la Belgique, soit beaucoup moins que les seules surfaces dédiées à la production de biocarburants aux États-Unis.

La conséquence la plus directe de l'empilement de sources fossiles est d'avoir engendré un accroissement considérable de la quantité d'énergie utilisée par nos sociétés.

Au début du  $\text{xix}^{\text{e}}$  siècle, la population mondiale était de l'ordre de 1,2 milliard d'habitants, chacun utilisant en moyenne environ 0,6 tonne d'équivalent pétrole (tep). À l'aube du  $\text{xx}^{\text{e}}$  siècle, on comptait 1,65 milliard de terriens pour une consommation unitaire de 0,7 tonne d'équivalent pétrole. La croissance démographique, couplée à l'amorce de l'exploitation des sources fossiles, conduisit à un doublement de la consommation totale d'énergie au  $\text{xix}^{\text{e}}$  siècle.

Le  $\text{xx}^{\text{e}}$  siècle a été marqué, notamment la seconde moitié, par une formidable accélération de la transition énergétique tirée par l'élargissement des sources primaires et la multiplication des usages liés à la diffusion de l'électricité, de la voiture, des produits chimiques dérivés des hydrocarbures... La consommation unitaire du terrien

moyen est passé de 0,7 à 1,7 tonne équivalent pétrole entre le début et la fin du siècle. Le nombre des terriens ayant été multiplié par plus de quatre, la consommation d'énergie au xx<sup>e</sup> siècle a été multipliée par neuf.

Les quinze premières années du xxi<sup>e</sup> siècle s'inscrivent dans la prolongation de cette tendance, la consommation mondiale d'énergie ayant augmenté de plus d'un tiers entre 2000 et 2015, un peu plus rapidement que la population mondiale. Un infléchissement apparaît cependant à partir de 2009, année de crise financière, qui se prolonge jusqu'en 2016. En 2017 et 2018, on a observé une reprise de la consommation d'énergie et des émissions de CO<sub>2</sub>, en partie liée à des facteurs conjoncturels (contrechoc pétrolier et reprise économique).

La quatrième transition énergétique est loin d'avoir fourni un accès satisfaisant à l'énergie pour tous. En 2016, un peu moins d'1 milliard de personnes (13 % de la population mondiale) n'ont pas accès à l'électricité. Environ 2,5 milliards (plus du tiers de la population mondiale) ont recours à des procédés de cuisson peu efficaces et très polluants à partir de la biomasse traditionnelle<sup>19</sup>. L'accès inégal à l'énergie reflète les écarts de la richesse distribuée dans le monde : en 2016, un terrien consomme en moyenne un peu moins de 2 tonnes d'équivalent pétrole, mais un Nord-Américain 7, un Indien moins de 1 et un Africain au sud du Sahara de l'ordre de 0,5.

## **LA BAISSÉ DES PRIX RELATIFS**

Sur le plan économique, les deux dernières transitions ont été déclenchées par une accumulation de capital matériel et immatériel à l'origine de gains de productivité massifs se diffusant dans le

système énergétique. Il en est résulté des mouvements de prix séculaires affectant la production et l'utilisation de l'énergie.

En théorie, l'évolution du prix des sources fossiles devrait suivre à long terme une trajectoire haussière à mesure que se raréfie le stock de réserves en terre, suivant un processus théorisé par l'économiste Hotelling<sup>20</sup>. Le prix des énergies fossiles, comme celui de la plupart des matières premières, s'inscrit pourtant à la baisse en termes réels depuis le début de la révolution industrielle, ce qui a favorisé leur utilisation. Cela ne remet pas en cause la thèse de Hotelling à très long terme, mais rappelle la temporalité dans laquelle elle s'inscrit. Le progrès dans les techniques d'exploration et de production permettent d'exploiter une fraction croissante des ressources en terre à des conditions économiques acceptables. C'est pourquoi la rareté géologique des gisements disponibles sous nos pieds a été sans cesse compensée par la capacité humaine d'accroître la fraction économiquement exploitable du stock.

Le prix du pétrole a par exemple baissé relativement au niveau général des prix pendant un siècle : entre les premières phases d'exploration en Pennsylvanie jusqu'à la décennie 1970. Cette baisse a constitué un puissant vecteur de sa pénétration dans le mix énergétique mondial. Les deux chocs de 1973 et 1979-1981 ont marqué la fin du pétrole bon marché et introduit une période de grande instabilité de son prix. Certains y ont vu le signe annonciateur d'un « pic pétrolier » imminent, relayant une longue tradition basée sur la « crainte de manquer » inaugurée par Malthus et Ricardo dès les premières phases de la révolution industrielle. Si le prix du pétrole est devenu plus instable, la tendance à la baisse de son prix relatif n'a cependant pas été clairement inversée depuis le premier choc pétrolier. En termes réels, le baril de pétrole est affecté sur les dernières décennies par une suite d'oscillations de

son cours, parfois assez brutales, sans claire tendance à la hausse préfigurant son épuisement prochain.

Pour comprendre le rôle des prix relatifs dans les transitions, l'observation du prix des sources primaires ne suffit pas. Il convient de distinguer, à la suite de Fouquet et Pearson (2012), le prix des sources utilisées, par exemple le carburant destiné au véhicule, de celui des services fournis grâce à ces sources : le nombre de kilomètres pouvant être parcourus, dans notre exemple. L'écart entre les deux prix mesure l'efficacité énergétique. Or, « si, sur quelques années, les gains d'efficacité et donc la différence entre le prix de l'énergie et celui des services énergétiques est faible, sur plusieurs décennies ou un siècle, la différence cumulée entre les deux tendances peut être considérable<sup>21</sup> ».

Le lien entre la diffusion des innovations dans l'éclairage et les prix relatifs a été étudié avec perspicacité par Fouquet et Pearson à partir de l'exemple du Royaume-Uni. Jusqu'au début du XVIII<sup>e</sup> siècle, le coût de la lumière ne varie guère, les gains d'efficacité dans la production et l'utilisation de la chandelle ou de la lampe à huile étant très faibles. L'irruption au XIX<sup>e</sup> siècle de sources nouvelles, d'origine fossile, couplées à des changements de techniques d'éclairage, modifie doublement la donne.

D'une part, l'abandon du suif, des huiles végétales et de l'huile de baleine au profit du gaz de ville, du pétrole lampant puis de l'électricité provoque une diminution du prix des énergies utilisées pour l'éclairage, baisses massives entre 1850 et 1920, plus lente et irrégulière par la suite.

D'autre part, les technologies du bec à gaz, de la lampe à pétrole et de l'ampoule à incandescence qui s'impose à partir des années 1930 démultiplient les gains d'efficacité en réduisant massivement le prix de l'éclairage pour les consommateurs. Contrairement à ceux

observés pour la fourniture d'énergie, ces gains ne fléchissent pas dans le courant du xx<sup>e</sup> siècle ou au début du xxi<sup>e</sup> siècle qui verra l'apparition des LED et autres ampoules basse consommation.

Conformément à ce que nous avons appris en visitant le phare des Baleines, ces sont les gains dans l'efficacité de la transformation de l'énergie en lumière qui ont constitué le principal moteur de la diffusion de l'éclairage via la baisse des prix relatifs. S'ajoutant à ceux obtenus dans la production d'énergie, ils n'ont rien à envier aux baisses de prix de la mémoire de nos ordinateurs. Difficile de départager celui qui baisse le plus rapidement entre le prix du lumen et celui du mégaoctet !

On retrouve un phénomène identique pour les carburants, y compris sur la période récente. Si depuis 1970 le prix du pétrole brut est affecté d'une grande instabilité, l'usage de l'automobile a continué d'être stimulé par la baisse des prix relatifs des carburants. L'économiste Michel Crozet nous rappelle ainsi qu'une heure de travail au salaire minimum permettait en France d'acheter 3 litres d'essence en 1970, 6 litres en 1995 et près de 7 litres en 2015<sup>22</sup>. Comme simultanément la consommation moyenne par véhicule a été divisée par deux pour des voitures comparables, le pouvoir d'achat du smicard exprimé en kilomètres parcourus a en réalité été multiplié par plus de quatre. Une évolution bien éloignée de la perception commune !

Le levier des gains de productivité dans la transformation des sources primaires d'énergie en usages finaux se retrouve dans de multiples domaines : production de chaleur, procédés industriels, transports aériens et maritimes... Il a joué un rôle crucial dans les deux dernières transitions énergétiques, contribuant puissamment via la baisse des prix relatifs à diffuser de nouveaux usages

énergétiques. Croissance des usages qui a dopé nos émissions de CO<sub>2</sub>.

## **L'ENVOL DES ÉMISSIONS DE CO<sub>2</sub>**<sup>23</sup>

Le mécanisme d'empilement des sources d'énergie constitutif des transitions énergétiques de l'époque moderne est la cause principale de l'envol des émissions anthropiques de gaz à effet de serre. Il déclenche vers 1850 un accroissement du volume des rejets de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère qui perdure sur plus d'un siècle et demi.

Jusqu'en 1850, la biomasse est le pilier du système énergétique, avec des renforts ponctuels de l'éolien et de l'hydraulique (moulins et navigation à voile) et un développement encore marginal du charbon en dehors du Royaume-Uni. Son usage s'inscrit dans un cycle court où la combustion ne fait que rejeter dans l'atmosphère le CO<sub>2</sub> préalablement stocké dans les plantes. C'est pourquoi les rejets de la combustion de biomasse ne sont pas comptabilisés parmi les émissions anthropiques de CO<sub>2</sub>. Mais sitôt que la biomasse énergétique contribue au défrichement des forêts ou à leur surexploitation, elle participe au réchauffement via les relâchés nets de CO<sub>2</sub> induits : un hectare de bois brûlé en forêt tropicale humide rejette par exemple de l'ordre de 400 à 700 tonnes de CO<sub>2</sub> auxquelles peuvent s'ajouter des émissions supplémentaires provenant du sol s'il est retourné pour implanter une culture. On décompte ces émissions dans une rubrique à part, repérable par l'acronyme un peu barbare de UTCATF (utilisation des terres, changement d'affectation des terres et foresterie)<sup>24</sup>.

Dans les systèmes énergétiques basés sur la biomasse, la déforestation constitue la principale empreinte humaine sur le climat. Elle résulte en premier lieu de l'expansion des terres utilisées pour

les cultures et l'élevage. Ses deux premiers foyers ont été observés en Europe et en Chine. L'Europe médiévale connaît une grande vague de défrichage provoquée par l'expansion agricole – Marc Bloch parle de « lutte contre l'arbre<sup>25</sup> » – qui culmine au XII<sup>e</sup> siècle ; une seconde vague apparaît au XVIII<sup>e</sup> siècle et se prolonge jusqu'à l'arrivée du charbon. Le foyer chinois apparaît plus tardivement, à la fin du XIV<sup>e</sup> siècle. Particulièrement important dans des provinces comme le Sichuan ou le Yunnan, le défrichement opéré par les agriculteurs et les éleveurs permet d'approvisionner une population qui passe de 70 millions d'habitants en 1400 à 410 millions en 1850.

En 1850, le défrichement des forêts contribue à plus de 90 % aux rejets anthropiques de CO<sub>2</sub> estimés à 2 tonnes par habitant et par an. Les émissions liées aux changements d'usage des sols restent majoritaires jusqu'au milieu du XX<sup>e</sup> siècle ([annexe 1](#)). Elles doublent entre 1850 et 1950. Entre 1850 et 1900, le principal foyer de déforestation se situe aux États-Unis, suivis d'assez loin par l'Asie et l'Europe. La conquête de l'Ouest exerça notamment une pression considérable sur la forêt par le développement des cultures dans ce que devinrent les grandes plaines céréalières, par la multiplication des ranchs où les cow-boys introduisirent à grande échelle l'élevage extensif des bovins et par la recherche du bois d'œuvre pour la construction des bâtiments et les traverses de chemin de fer. La géographie de la déforestation basculera ensuite graduellement vers la Chine, le Sud-Est asiatique et l'Union soviétique. Après 1950, les principaux foyers de déforestation affectent la forêt tropicale : Amazonie, arc forestier du Sud-Est asiatique, bassin du Congo et savane arborée en Afrique.

Les émissions liées à l'usage des fossiles décollent avec le charbon. Elles progressent très rapidement jusqu'à la Première Guerre mondiale du fait de la diffusion du nouveau combustible dans



les chemins de fer, le chauffage et les industries métallurgiques. Les émissions provenant de la combustion du pétrole s'y ajoutent à partir de 1920, mais leur dynamisme est bridé entre 1910 et 1950 par les déboires de l'économie mondiale induits par les deux conflits mondiaux et la crise de 1929. En 1950, un terrien émet en moyenne quelque 2,2 tonnes de CO<sub>2</sub> en brûlant des fossiles, principalement le charbon, ou en produisant du ciment, et à peu près autant en défrichant la forêt ; 80 % de ces rejets proviennent alors des pays développés.

Le phénomène d'empilement s'accélère à partir de 1950. La période de l'après-guerre, qualifiée « d'âge d'or » par l'économiste américain Angus Maddison<sup>26</sup> et des Trente Glorieuses par le Français Jean Fourastié<sup>27</sup>, connaît un sursaut de croissance. La population mondiale connaît sa vitesse de croissance maximale durant les décennies 1950 et 1960. L'attraction des villes semble irrésistible. La consommation de masse devient la norme dans les pays occidentaux et au Japon. La voiture et le camion s'imposent sur les routes. C'est la grande ère du pétrole bon marché qui supplante le charbon comme première source d'émission de CO<sub>2</sub> à la fin des années 1960. Les émissions liées à l'usage de gaz naturel viennent s'y ajouter, mais représentent encore moins de 10 % du total en 1980.

Hors déforestation, les émissions de CO<sub>2</sub> atteignent 4,4 tonnes par habitant en 1980, soit le double de celles de 1950. Elles sont aux trois quarts le fait des pays industrialisés qui ont cessé de déforester, mais ont accru leur consommation de pétrole et à un moindre degré de gaz naturel, sans significativement réduire celle de charbon.

## **LES RELAIS DE CROISSANCE**

Le phénomène de l'empilement des sources d'émission prend des formes nouvelles à partir de 1980. Aux sources conventionnelles d'énergie fossile s'ajoutent les gaz et pétroles de schiste qui élargissent les gisements économiquement exploitables. La globalisation de l'économie provoque des redistributions de l'activité vers les pays émergents. Les relocalisations industrielles accélèrent la mobilité des marchandises et des personnes, et déplacent une partie des émissions vers les nouveaux centres producteurs principalement situés en Asie. En 2007, la population des villes dépasse celle des campagnes. Le fait urbain devient majoritaire et s'accompagne d'un élargissement rapide de la consommation de masse dans les pays émergents.

Entre 1980 et 2000, la croissance commence à se redistribuer vers les économies émergentes, mais le mouvement est freiné par la crise de la dette en Amérique latine puis l'implosion du système soviétique. Au sein des pays développés, le renchérissement du pétrole consécutif aux chocs pétroliers profite d'abord au gaz naturel, dont la combustion émet nettement moins de CO<sub>2</sub> que le charbon pour produire la même quantité d'énergie, et dans une moindre mesure au nucléaire. Le pic des émissions est atteint dès 1980 dans l'Union européenne. Durant ces deux décennies, l'augmentation des émissions mondiales est moins rapide que celle de la population. Au seuil du <sup>xxi</sup><sup>e</sup> siècle, un terrien émet en moyenne 4 tonnes de CO<sub>2</sub>, hors déforestation, un peu moins qu'en 1980.

La première décennie de ce siècle connaît un retour massif vers le charbon, provoqué par un appétit sans limite en Chine et les besoins du secteur électrique dans nombre de pays émergents, grands ou petits. L'empilement des sources joue à plein, car la demande de gaz et de pétrole est simultanément tirée par la vigueur du cycle ayant précédé la crise financière de 2008. En dix ans, les

émissions de CO<sub>2</sub> d'origine énergétique et industrielle remontent de 4 à 4,8 tonnes par habitant. On retrouve des rythmes inconnus depuis l'« âge d'or », dont le moteur principal s'est déplacé vers les pays émergents d'Asie.

La réorientation de la stratégie chinoise, contrainte de réagir à la montée des pollutions locales par un grand coup de frein sur le charbon et un investissement massif dans les énergies renouvelables, est la cause principale du ralentissement observé au début de la décennie 2010-2020. Il s'y ajoute l'effet du recul des émissions de CO<sub>2</sub> aux États-Unis résultant de la bascule du charbon vers le gaz de schiste. Globalement, les émissions de CO<sub>2</sub> d'origine énergétique et industrielle semblent se stabiliser entre 2014 et 2016. Elles augmentent à nouveau en 2017 et 2018 pour atteindre le niveau sans précédent de 37 milliards de tonnes de CO<sub>2</sub> (4,9 tonnes par habitant) en 2018.

La géographie de ces émissions s'est radicalement modifiée. Initialement concentrés en Europe et en Amérique du Nord, les rejets de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère étaient encore aux trois quarts le fait des pays industrialisés en 1980. Leur poids était tombé en dessous de 40 % en 2018. L'Asie, Chine en tête, a pris la plus grande partie de la place laissée par le recul des pays développés.

## **AU JEU DES VASES COMMUNICANTS**

Avec ces redistributions géographiques, le mécanisme de l'empilement prend des formes plus complexes. L'Europe a par exemple atteint son pic d'émission en 1980 et réduit d'un quart ses rejets atmosphériques depuis. À l'intérieur de ses frontières, on a bien observé une certaine substitution entre sources énergétiques, depuis le charbon (et le pétrole dans une moindre mesure) vers le

gaz naturel (et le nucléaire pour certains pays avec un zeste de renouvelables en fin de période). Pour une part, cette substitution est en trompe-l'œil. Une partie de ces gains résulte de la relocalisation à l'extérieur des frontières d'industries approvisionnant le marché européen. L'empreinte carbone de l'Europe doit donc tenir compte des émissions de CO<sub>2</sub> indirectes résultant du commerce international.

Autre exemple : les États-Unis ont atteint leur pic d'émission en 2005 et réduit de 15 % leurs émissions depuis, principalement en substituant du charbon par du gaz devenu bien plus compétitif pour produire l'électricité. Ici encore, une substitution à l'intérieur du territoire qui semble échapper à la logique de l'empilement. Mais une partie du charbon américain non brûlé dans les centrales électriques peut être exportée en Asie ou en Europe. La substitution aura alors été en trompe-l'œil à l'échelle globale.

Ces deux exemples nous rappellent notre visite au phare des Baleines. Tant que le phare brûlait directement du charbon ou du pétrole pour produire ses rayons lumineux, la mesure de son empreinte carbone était directe. Les émissions apparaissaient dans sa chambre de combustion. Avec le raccordement du phare au réseau électrique, le lieu d'émission de l'énergie utilisée s'est éloigné. De plus, l'activité du phare a dynamisé les émissions du transport maritime à partir du moment où les bateaux ont remplacé leurs voiles par des chaudières à charbon puis des moteurs diesel. Le phare n'émet directement plus aucun CO<sub>2</sub>. Mais son empreinte carbone doit désormais tenir compte de l'ensemble de ces émissions à distance. Et dans ce jeu de vases communicants, la réduction des émissions directes a pu être plus que compensée par l'accroissement de celles à distance.

Il en va de même à l'échelle globale. La mondialisation accroît l'interdépendance des économies. Elle relocalise certaines industries et diffuse des modèles de consommation énergivores. Les redistributions géographiques de l'activité provoquent des phénomènes de vases communicants sur les émissions de CO<sub>2</sub>. À partir d'un certain niveau de richesse, les émissions par tête tendent à plafonner puis à reculer. L'Europe a été la première à l'expérimenter, suivie par les États-Unis avec un quart de siècle de décalage. Mais d'autres zones ont pris le relais. Du fait des vases communicants, la mécanique de l'empilement a continué à jouer à plein sur le plan global.

Au cours des dernières décennies, les vases communicants ont principalement conduit à relocaliser les émissions en Asie. Le phénomène a été particulièrement rapide en Chine où le montant des émissions de CO<sub>2</sub> par tête a dépassé celui des Européens en fin de période. Elles vont probablement à leur tour se stabiliser puis diminuer une fois le pic passé. La mécanique de l'empilement sera-t-elle pour autant interrompue ?

Tout dépendra des modalités de la croissance (ou de la décroissance) future. Mettre un coup d'arrêt à la dynamique de l'empilement implique de casser ce jeu des vases communicants. Dans les pays riches, un recul bien plus rapide des émissions est possible. Mais son lien avec l'activité et le niveau de vie reste incertain, ce qui bloque ou ralentit le mouvement. À l'autre extrémité des vases communicants, il subsiste un énorme potentiel d'augmentation des émissions si les pays moins avancés reproduisent les schémas historiques de développement. L'enjeu de demain concerne certains pays d'Asie (Inde, Indonésie, Bangladesh...) et encore plus le continent africain.

En 2015, chaque terrien a émis en moyenne 4,8 tonnes de CO<sub>2</sub>, mais 11 s'il vivait en Amérique du Nord ou dans l'Union européenne et 1 s'il était basé en Afrique. Imaginons que chaque habitant des pays occidentaux divise par quatre ses émissions d'ici 2050 et que les Africains rejoignent en 2050 le niveau moyen d'émission par habitant de 2015. L'arithmétique est implacable : les Occidentaux auront réduit leurs émissions de près de 9 Gt, mais les Africains auront accru les leurs de près de 11 Gt. Les vases communicants auront joué à plein en prolongeant la mécanique de l'empilement. L'Afrique pourrait-elle devenir le premier continent où le décollage économique ne se sera pas accompagné d'une envolée de l'empreinte carbone ? Probablement l'une des questions les plus décisives des prochaines décennies en matière climatique.

Autre dimension des vases communicants : la transmission de l'empilement des émissions à celui des marchandises. La dynamique historique de l'empilement n'a pas concerné que l'énergie et les rejets de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère. L'énergie additionnelle a été utilisée pour la fabrication, le transport et l'utilisation de marchandises toujours plus abondantes. Apparue dans les années 1920 en Amérique du Nord, la consommation de masse a ensuite touché des couches de plus en plus larges de la population mondiale. Croissance économique et émissions de CO<sub>2</sub> ont donc historiquement été fortement corrélées. Hausse du niveau de vie, confort matériel, mobilité et ouverture sur le monde en constituent la face positive.

N'oublions pas sa face sombre : dégradations de l'environnement, creusement des inégalités, encombrements et saturation des besoins. Sans évoquer la question de l'absurdité de l'hyperconsommation qui fait penser à la pièce de Ionesco *Les chaises*<sup>28</sup>. Ces chaises s'empilent à mesure du déroulement de

l'intrigue. Elles repoussent les personnages qui n'ont plus d'autre issue à la fin du spectacle que de s'échapper par la fenêtre. Nous quittons le théâtre face à un scène remplie d'objets mais vide d'humains. Un empilement de marchandises, synonyme de perte de sens. La meilleure façon de retrouver du sens serait-elle dès lors de rompre avec la logique de l'empilement par un retour à la frugalité ?

Derrière la question de la prochaine transition énergétique se profile aussi celle des modèles de croissance de nos sociétés. Voire de leur décroissance.

## **LA CINQUIÈME TRANSITION ÉNERGÉTIQUE**

L'empilement des trois sources d'énergie fossile a constitué le trait essentiel du  $xx^e$  siècle sous l'angle de l'environnement et du climat : les terriens ont rejeté dans l'atmosphère de l'ordre de 2 350 milliards de tonnes de  $CO_2$  entre 1850 et 2018. Le phénomène n'a cessé de s'accélérer : sur ces 2 350 milliards, 42 % ont été relâchées depuis 1990 et 30 % entre 2000 et 2018.

Désempiler ces sources en retirant les fossiles du système énergétique sera la grande affaire de la prochaine transition énergétique. La cinquième dans l'histoire de l'humanité si l'on retient notre découpage temporel.

Cette transition – nommons la « transition bas carbone » – est absolument inévitable pour des raisons géologiques. Les énergies fossiles s'épuisent à mesure de leur utilisation et il faudrait des millions d'années pour qu'elles puissent se reconstituer naturellement. La raréfaction de leurs stocks se traduira inévitablement à terme par une hausse rédhibitoire de leur coût, les rendant économiquement inutilisables. Le schéma de Hotelling finira

par s'imposer. Ce n'est qu'une question de temps. Mais de combien de temps ?

D'après les tenants du « pic pétrolier », réunis dans l'association ASPO (Association for the Study of Peak Oil), ce pic est plus proche qu'on ne l'imagine et pourrait affecter l'ensemble des fossiles<sup>29</sup>. Leurs analyses reposent sur la méthode du géophysicien King Hubbert, célèbre pour sa courbe en cloche permettant d'anticiper le déclin de la production de pétrole. À partir de ses observations du fonctionnement des puits de pétrole, Hubbert annonça avec prémonition le déclin des gisements conventionnels de pétrole au Texas dès les années 1960. Mais s'il a prévu le déclin de l'exploitation pétrolière conventionnelle aux États-Unis, il n'a pas anticipé le développement des pétroles et gaz de schiste : de nouvelles sources venant s'ajouter aux anciennes, susceptibles de prolonger pendant de longues décennies l'exploitation des hydrocarbures en Amérique du Nord. Comme beaucoup d'observateurs avant lui, il a sous-estimé la capacité de nos sociétés à extraire une fraction toujours plus grande des gisements du sous-sol.

Les alertes sur la finitude du stock d'énergie fossile sous nos pieds ont une grande vertu. Celle de rappeler le caractère non soutenable du système énergétique issu de la mécanique de l'empilement. Peut-on pour autant compter sur l'épuisement graduel des réserves d'énergie fossile pour engager la transition bas carbone ? Parfois suggérée par les géologues<sup>30</sup>, cette recommandation pourrait conduire à de graves déconvenues sous l'angle du climat.

Depuis deux siècles, les transitions énergétiques résultent de l'action des hommes confrontés à la rareté des gisements de carbone fossilisés dans le sous-sol sous forme de charbon, de



pétrole ou de gaz : le « carbone d'en bas ». De Jevons (1856), pointant les risques d'épuisement du charbon au Royaume-Uni<sup>31</sup>, au premier rapport Meadows (1972) annonçant la fin de la croissance<sup>32</sup>, les alertes se sont succédé sur les risques d'épuisement de la ressource. Elles ont jusqu'à présent toujours été démenties par l'ingéniosité des hommes à repousser le mur de la rareté. Et comme l'écorce terrestre recèle encore d'abondantes ressources inexploitées ou inexplorées, le processus est sans doute loin d'être terminé.

Le risque climatique nous oblige à considérer un autre stock : celui du « carbone d'en haut » qui s'accumule dans l'atmosphère en dérégulant le climat. Le problème n'est plus sa rareté, mais son trop-plein qu'il faut endiguer pour atténuer le réchauffement.

S'en remettre à la rareté de la ressource en terre pour contrôler ce stock d'en haut n'est guère responsable. L'histoire nous enseigne combien ces processus de transition prennent du temps. Au terme de son ouvrage sur la question, le constat de Smil est sans appel : « Tous les basculements vers de nouvelles sources primaires d'énergie ont été dans le passé des affaires graduelles et de longue durée, avec de nouvelles sources prenant de longues décennies de production avant de devenir des contributeurs significatifs<sup>33</sup>. » L'auteur ajoute, page suivante, qu'il ne détecte aucune accélération du mouvement pour le déploiement des sources solaires et éoliennes susceptibles de se substituer demain aux énergies fossiles. Elles ne sont donc pas prêtes de détrôner les fossiles si on reproduit les schémas du passé !

Pour être en phase avec le risque climatique, la cinquième transition énergétique doit emprunter des chemins tout à fait nouveaux. Elle doit abandonner la logique de l'empilement en court-circuitant le rythme d'exploitation de la ressource fossile. Et le faire

rapidement. Les climatologues nous le rappellent avec constance : c'est le tic-tac de l'horloge climatique qui doit rythmer la cinquième transition énergétique. Pour comprendre leurs messages, cessons de scruter le sous-sol à la recherche du carbone d'en bas et levons les yeux pour comprendre comment le carbone d'en haut déplace l'aiguille de la grande horloge climatique.

## CHAPITRE 2

# L'HORLOGE CLIMATIQUE

En vidant l'écorce terrestre d'une partie de son stock de carbone fossilisé, les terriens ont court-circuité le temps géologique. La nature a mis des dizaines de millions d'années à produire les dépôts souterrains de charbon, de pétrole et de gaz à partir de la matière vivante. Pour satisfaire nos appétits énergivores, nous les brûlons massivement en rejetant bien plus de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère que ne peuvent en absorber les puits de carbone naturels constitués par la végétation, les sols et les océans. Il en résulte un accroissement du stock de CO<sub>2</sub> présent dans l'atmosphère qui agit, via l'effet de serre, comme une « couverture » réchauffant la surface de la Planète<sup>1</sup>.

Une horloge mesure le temps qui passe. Nous abordons ce chapitre en observant les températures d'hier et celles d'aujourd'hui. Les échelles de temps utilisées sont déterminantes. Nous sommes habitués à des fluctuations conséquentes du thermomètre, entre le jour et la nuit, l'été et l'hiver, les beaux jours et les soirées pluvieuses... À long terme, des variations bien moindres de la température marquent les ères géologiques. Les terriens ont bénéficié d'une ère de stabilité remarquable du climat, l'Holocène, une période interglaciaire amorcée voici environ 11 000 ans. En court-circuitant le temps géologique, ils sont entrés dans l'ère de

l'Anthropocène où ce sont leurs comportements qui animent désormais les mouvements de l'horloge climatique.

Pour comprendre la mécanique de cette horloge, il convient de rattacher les flux d'émission au stock des gaz à effet de serre dans l'atmosphère qui est la variable agissant sur les températures. Ce passage du flux au stock évoque l'horrible problème du robinet et du remplissage de la baignoire qui nous causa tant de tracas sur les bancs du collège. Il est pourtant essentiel pour appréhender correctement le risque climatique. Il nous faudra donc l'examiner plus en détail pour le CO<sub>2</sub>, les autres gaz à effet de serre et aussi certaines particules non gazeuses qui viennent complexifier l'affaire.

Une fois ce passage du flux au stock effectué, nous pouvons examiner les liens entre le montant de nos émissions et le réchauffement global. Les climatologues ont calculé un budget carbone global, représentant le cumul des émissions de CO<sub>2</sub> donnant deux chances sur trois de limiter le réchauffement à 2 °C. En 1992, année d'adoption de la Convention-cadre sur le climat au Sommet de la Terre de Rio, les terriens avaient pratiquement consommé la moitié de ce budget ; au niveau d'émission d'alors, il leur restait une soixantaine d'années avant de l'épuiser. En 2018, plus des trois quarts du budget ont été consommés ; à niveau d'émission inchangé, il sera épuisé en deux décennies. Pour viser un réchauffement moyen de 1,5 °C, son épuisement interviendrait en moins de 10 ans à émissions inchangées !

Si l'accélération de l'horloge climatique ne fait aucun doute, le chiffre indiqué par l'aiguille est soumis à de nombreuses incertitudes. Les liens entre les émissions des terriens et les mouvements du thermomètre sont loin d'être linéaires du fait des multiples rétroactions qui peuvent amplifier ou amortir le réchauffement initialement provoqué par l'accroissement du stock de CO<sub>2</sub>. Ces

incertitudes peuvent agir dans les deux sens. Leur prise en compte devrait renforcer la détermination de nos sociétés à agir promptement face aux risques générés par le réchauffement global, nous répètent les climatologues.

## **TEMPÉRATURES D'HIER ET D'AUJOURD'HUI**

Surtout pour ceux d'entre nous vivant sous des climats continentaux, nous sommes habitués à des écarts de température très conséquents : 30 °C entre les mois de juillet et de décembre à Montréal ; 12 °C entre le jour et la nuit à Moscou au mois de septembre ; 5 °C entre l'heure de la pause-café que vient de prendre l'auteur de ces lignes et celle de son levé matinal (Neuilly-Plaisance, région parisienne, le 6 septembre 2018). Nos modes de vie ont permis à nos organismes de s'adapter sans difficulté à de tels écarts que nous ne ressentons absolument pas comme des anomalies.

En comparaison, le réchauffement moyen de la Planète pourrait sembler anodin. Dans son cinquième rapport d'évaluation, le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) estime à 0,85 °C la hausse de la température moyenne à la surface du globe entre 1880 et 2012<sup>2</sup>. Depuis 2012, le réchauffement observé s'est accéléré. Pour l'année 2017, le rapport de l'Organisation météorologique mondiale estimait à 1,1 °C le réchauffement moyen relativement à l'âge préindustriel, deuxième année la plus chaude jamais observée après... 2016 (+ 1,2 °C)<sup>3</sup>. Regardons ce qui se cache derrière de telles variations.

Les oscillations de long terme de la température moyenne à la surface de la Planète sont de bien moindre ampleur que celles de notre quotidien. Les paléoclimatologues sont parvenus à les reconstituer depuis quelques centaines de milliers d'années. Des

variations de l'ordre de 4 à 7 °C ont provoqué des cycles de glaciation-déglaciation modifiant radicalement le visage de la Terre. Au dernier pic de glaciation, il y a 20 000 ans, la température moyenne n'était inférieure que d'environ 5 °C à celle observée au <sup>xx</sup><sup>e</sup> siècle. Les glaciers des Alpes descendaient jusqu'à Lyon. D'immenses calottes glaciaires recouvrant le Groenland, l'Amérique du Nord et la Sibérie bloquaient l'écoulement de l'eau vers la mer. La Manche était à sec et l'Angleterre rattachée au continent européen. Il fallait parcourir plusieurs dizaines de kilomètres depuis la pointe du Raz pour atteindre la côte atlantique<sup>4</sup>.

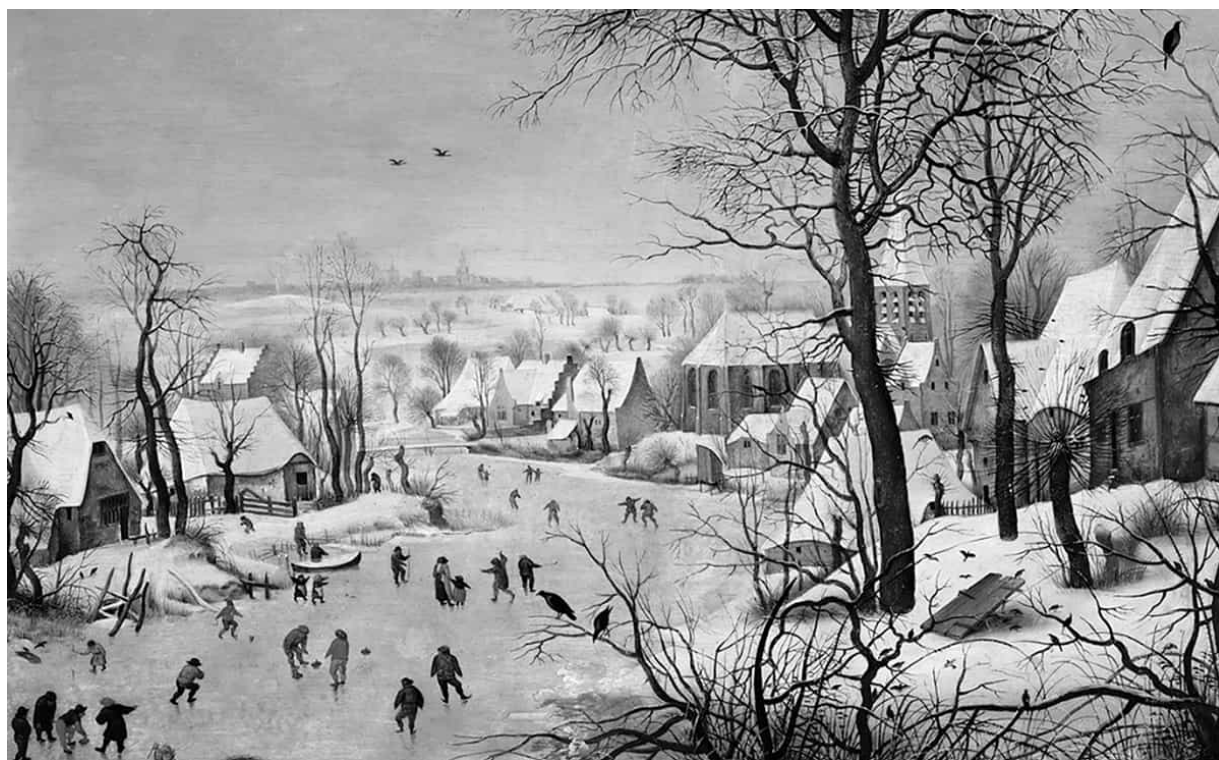
Nous avons quitté cette dernière époque glaciaire qui durait depuis 110 000 ans pour entrer dans une période plus chaude qui démarra il y a un peu plus de 10 000 ans : l'Holocène. Comme lors des cycles précédents, ce sont les modifications intervenues dans le tracé de l'orbite de la Terre autour du Soleil qui ont provoqué ce réchauffement. Ce tracé conditionne en effet la distribution des rayons solaires atteignant notre Planète et, par voie de conséquence, l'énergie qu'elle absorbe. Milutin Milankovitch démontra que ces déplacements orbitaux ont constitué le facteur déclencheur de ces cycles longs de glaciation-déglaciation tout au long de l'ère Quaternaire.

Ce réchauffement de 5 °C s'est étalé sur plusieurs milliers d'années. Il n'a pas été régulier. Le géophysicien Wallace Smith Broecker, l'un des premiers à avoir alerté sur les risques du réchauffement climatique, a montré la brutalité de certains à-coups climatiques déclenchés par des modifications brusques des courants océaniques<sup>5</sup>. Mais pour changer de période géologique, il a fallu un réchauffement s'étalant sur plusieurs milliers d'années, dix fois plus lent que celui observé au <sup>xx</sup><sup>e</sup> siècle<sup>6</sup>.

L'époque de l'Holocène présente une stabilité remarquable du climat dont a bénéficié notre espèce pour étendre son empreinte sur la plus grande partie de la Planète. Cette stabilité n'exclut pas des changements régionaux plus ou moins marqués. Comme en témoignent nombre de peintures rupestres, le Sahara a été, il y a quelques milliers d'années, un pays luxuriant. Plus proche de nous, une période plus chaude, qualifiée d'« optimum médiéval », a adouci les conditions de vie en Europe septentrionale. Un « petit âge glaciaire » lui succéda, du milieu du <sup>xiv</sup><sup>e</sup> siècle jusqu'à la fin de l'ère préindustrielle, documenté avec beaucoup de précisions par Emmanuel Le Roy Ladurie<sup>7</sup>. La baisse des températures moyennes a été alors de l'ordre de 1 °C en France, et probablement nettement plus aux Pays-Bas.

Nous devons à ce petit âge glaciaire les splendides toiles de Brueghel, avec leurs myriades de patineurs sur les fleuves gelés, sur fond de paysages figés dans le givre. Dans sa fameuse toile *Paysage d'hiver avec patineurs et trappe à oiseaux*, on distingue un trébuchet, un piège de bois sous lequel les oiseaux picorent gaillardement. Une corde le rattache à une maison pour faire basculer la planche. Le piège sera fatal. N'est-ce pas la présence de la mort que le maître a voulu ainsi symboliser sur sa toile ? Durant toute cette période, le froid est synonyme de pertes de récolte, de disettes, de mortalité accrue. Les hommes appellent de leurs vœux un réchauffement pour amoindrir la dureté de l'existence.

## Figure 2.1 Le « petit âge glaciaire » vu par la peinture flamande primitive



« Paysages d'hiver avec patineurs et trappe aux oiseaux », 1565, Peter Brueghel, Musée des Beaux-Arts de Bruxelles.

*Nombre de toiles de Brueghel témoignent du « petit âge glaciaire » qui frappa l'Europe de l'Ouest de la fin du Moyen Âge jusque vers 1800.*

Parmi eux, un certain Svante Arrhenius (1859-1927) effectue ses travaux de chimiste qui lui vaudront le prix Nobel en 1904. Il officie à l'Académie royale de Stockholm, une ville où le thermomètre est en dessous de zéro une bonne partie de l'année. Reprenant les travaux du Français Fourier et du Britannique Tyndall sur l'effet de serre, Arrhenius calcule en 1896 l'impact d'un doublement de la concentration atmosphérique de  $\text{CO}_2$  sur la température moyenne à la surface du globe. Impact qu'il chiffre à 5-6 °C. À l'époque, on pensait qu'un tel doublement interviendrait au terme de plusieurs



milliers d'années, bien trop tardivement pour alléger les souffrances des hommes imposées par la rudesse du climat.

Nul ne pouvait prévoir la formidable accélération de l'horloge climatique qui était en train de se produire. En allant rechercher l'énergie concentrée dans des matières autrefois vivantes que la nature a mis des centaines de millions d'années à fossiliser, les terriens avaient déjà commencé à court-circuiter le temps géologique. Ils quittaient l'intermède de stabilité climatique que constitua l'Holocène, pour nous précipiter dans celle de l'Anthropocène. Une ère que le chimiste Crutzen, le père de la formule, fait démarrer en 1800<sup>8</sup>. Dans l'Anthropocène, c'est le comportement des hommes qui est devenu, via leurs rejets de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère, la variable principale gouvernant les changements de la température.

## **FRAGILE ATMOSPHÈRE**

L'atmosphère est une couche de gaz enveloppant la Planète. Nous avons parfois l'impression qu'elle est immense, comme sans fin. Élevons-nous à 10 km, l'altitude où volent les avions de ligne. Nous avons sous nos ailes 80 % de sa masse gazeuse. Nous pénétrons dans la stratosphère qui s'étire jusqu'à 50 km. Le gaz y est devenu bien plus rare. On y trouve cependant la plus grande partie de l'ozone présent dans l'atmosphère. L'ozone stratosphérique joue un rôle très important pour la vie sur Terre en filtrant les rayons ultraviolets provenant du soleil. Au-delà de 50 km, il n'y a plus que des molécules dispersées, la masse gazeuse devient négligeable.

Une enveloppe de 50 km couvrant une sphère de 40 000 km de diamètre. En proportion, cela équivaut à une pellicule de moins de

2 mm autour d'un ballon de football ! Cette couche extrêmement fine est composée à plus de 98 % d'azote et d'oxygène. En beaucoup plus petite quantité, elle contient des gaz qui ont la propriété d'absorber une partie des rayons infrarouges émis à la surface de la Terre en les renvoyant au sol. Ce sont les gaz à effet de serre qui agissent comme une couverture chauffante. La stabilité de leur stock dans l'atmosphère a permis durant toute la période de l'Holocène de maintenir la température moyenne de la Terre aux alentours de 14 °C.

Mais cette mince pellicule est facilement altérée par les rejets anthropiques. Or, une modification apparemment minime de la composition de l'atmosphère peut avoir des conséquences globales redoutables. La première alerte concerna la couche d'ozone altérée par des rejets de gaz utilisés pour la réfrigération et dans les vaporisateurs. Le fameux « trou » de la couche d'ozone, détectée au milieu des années 1970, ouvrait une brèche aux rayons ultraviolets, mortifères pour nombre d'organismes vivants. L'action commune contre sa destruction porta rapidement ses fruits. La seconde altération globale résulta des rejets anthropiques de CO<sub>2</sub>, à un rythme bien supérieur à ce que pouvaient imaginer les contemporains d'Arrhenius.

Le principal gaz à effet de serre est la vapeur d'eau, dont la teneur atmosphérique varie en permanence, certains jours ou saisons étant bien plus humides que d'autres. L'activité humaine n'a pas d'impact direct significatif sur cette teneur.

Il en va différemment du CO<sub>2</sub> qui compose moins de 0,05 % de l'atmosphère, mais constitue le second gaz à effet de serre présent dans l'atmosphère. Sa teneur moyenne avant le démarrage de la révolution industrielle était de l'ordre de 280 parties par million (ppm). En 2018, elle a atteint la barre des 410 ppm. Le CO<sub>2</sub> est d'assez loin

le premier gaz à effet de serre dont la teneur est affectée par l'activité anthropique.

L'accroissement du stock de  $\text{CO}_2$  dans l'atmosphère constitue le moteur principal de l'horloge climatique. D'après le cinquième rapport d'évaluation du GIEC, il a contribué à hauteur des deux tiers au réchauffement d'origine anthropique de l'ère moderne. Mais il n'est pas le seul. L'atmosphère comprend d'autres gaz à effet de serre piégeant les rayons infrarouges que l'activité humaine a renforcés ou introduits depuis l'enclenchement de la révolution industrielle. Pour bien comprendre la dynamique du réchauffement global et les voies de son atténuation, il faut les intégrer dans l'analyse.

## **LE $\text{CO}_2$ ET LES AUTRES**

Comme le  $\text{CO}_2$ , le méthane ( $\text{CH}_4$ ) et le protoxyde d'azote ( $\text{N}_2\text{O}$ ) sont deux gaz à effet de serre existant à l'état naturel dont les terriens ont modifié la teneur atmosphérique. Nous les connaissons bien. Le méthane est le principal composant du gaz naturel utilisé dans nos cuisinières et autres appareils de chauffage. Le protoxyde d'azote, couramment dénommé gaz hilarant, est utilisé pour ses propriétés anesthésiantes dans la plupart des blocs opératoires. Beaucoup d'entre nous l'ont inhalé avant de passer entre les mains du chirurgien.

Le méthane est le produit de la fermentation anaérobie (sans oxygène) de matières organiques. C'est pourquoi les marais, plus généralement les milieux humides, sont sa première source d'émission naturelle. L'agriculture et l'élevage, auxquels on peut ajouter le traitement des déchets organiques qui en sont l'ultime maillon aval, sont à l'origine d'environ deux tiers des émissions

mondiales de méthane. Les autres sources sont principalement les fuites de gaz dans les industries gazières et les mines de charbon. Depuis le début de l'ère industrielle, la concentration de méthane a plus que doublé, représentant la deuxième cause anthropique d'accroissement de l'effet de serre. Le méthane a une durée de vie relativement courte, de l'ordre de 12 ans, dans l'atmosphère. La réduction de ses émissions peut avoir un effet relativement rapide sur le stock présent dans l'atmosphère. *A contrario*, chaque tonne de méthane supplémentaire rejetée a un pouvoir de réchauffement équivalent à celui de 28 tonnes de CO<sub>2</sub> sur 100 ans et de 84 tonnes sur 20 ans. On voit tout le bénéfice que peut apporter une réduction rapide de ses émissions.

Le protoxyde d'azote est un gaz existant à l'état naturel, mais dont la teneur atmosphérique a augmenté d'un peu plus de 20 % depuis le début de l'ère industrielle. Sa principale source anthropique n'est pourtant pas l'industrie mais l'agriculture. La majorité des rejets de protoxyde d'azote résulte de l'épandage de fertilisants azotés pour accroître le rendement des sols agricoles. Les rejets de l'industrie sont concentrés sur certains procédés chimiques, comme la fabrication de nylon. Enfin, le N<sub>2</sub>O est un résidu de la combustion de biomasse. Une fois rejeté dans l'atmosphère, le protoxyde d'azote y demeure en moyenne 121 ans. Réduire ses émissions n'agit donc qu'avec de longs délais sur le stock atmosphérique, mais de façon très significative à long terme : son pouvoir de réchauffement sur 100 ans est 265 fois celui du CO<sub>2</sub>.

Pour compléter notre compréhension des liens entre les altérations de l'atmosphère et la température moyenne, il convient d'introduire des gaz de synthèse de la famille des halocarbures, présents en quantités infimes dans l'atmosphère, puisqu'ils n'existaient pas à l'état naturel, mais dont les rejets humains ont eu

des conséquences majeures. Les plus importants sont les chlorofluorocarbures (CFC), parfois connus sous l'appellation commerciale de Fréon. S'ils ne sont aujourd'hui pratiquement plus utilisés, le cumul de leurs émissions a eu une contribution au réchauffement global de même ordre de grandeur que celle du méthane.

Les CFC ont été introduits dans l'industrie mondiale à la suite des travaux du chimiste américain Thomas Midgley (1889-1944), personnage tout à fait singulier. Midgley démarre sa carrière après la Première Guerre mondiale au centre de recherche de General Motors où il met au point les premiers additifs plombés pour essence qui diminuent les cliquetis du moteur et améliorent sa performance. Dès le démarrage, le produit est suspecté d'avoir des effets nocifs. Midgley ne craint pas de l'inhaler en public pour convaincre de son innocuité. Quelques années plus tard, Midgley travaille pour une autre filiale de General Motors : Frigidaire. Les réfrigérateurs de l'époque fonctionnent avec des gaz qui sont peu efficaces, toxiques et de surcroît explosifs. Il découvre alors les propriétés des CFC qui sont des gaz très stables, non explosifs et sans effets sanitaires directs. Les CFC remplacent rapidement les autres gaz dans les réfrigérateurs et leurs usages se multiplient après-guerre avec la diffusion de la climatisation et des vaporisateurs. Or, si les CFC sont bien, contrairement au plomb utilisé dans l'essence, inoffensifs pour la santé, ils sont à effet de serre et détruisent par réaction chimique les molécules d'ozone. Ce qui fait dire à John McNeill que Thomas Midgley, fort de ses deux découvertes, a eu « plus d'impact sur l'atmosphère qu'aucun être vivant dans l'histoire de la Planète<sup>9</sup> ». On peut du reste discuter ce point. D'autres inventeurs, tels James Watt (1736-1819) avec sa machine à vapeur ou Rudolf Diesel (1858-

1917) avec son moteur à combustion interne, ont également pas mal contribué !

## **OZONE ET EFFET DE SERRE : LIAISONS DANGEREUSES**

90 % de l'ozone ( $O_3$ ) se trouve dans la stratosphère<sup>10</sup>. Produit naturellement par réaction de l'oxygène aux rayons du soleil, sa couche forme un bouclier nous protégeant de l'influence mortifère des ultraviolets. Or, les gaz CFC utilisés massivement après-guerre grâce aux trouvailles de Midgley ont la propriété, lorsqu'ils parviennent dans ce compartiment de l'atmosphère, de bloquer la réaction chimique produisant l'ozone. Le lien entre les émissions de CFC et l'altération de la couche d'ozone fut établi à la fin des années 1970 par des chimistes à qui fut décerné par la suite le prix Nobel : Paul Crutzen, Mario Molina et Frank Sherwood Rowland. Contesté au démarrage par les industriels produisant ces gaz, la prise de conscience de ce lien fut facilitée au milieu des années 1980 par le revirement de l'un des plus influents d'entre eux : la puissante société Dupont de Nemours qui dans l'intervalle avait trouvé un substitut. Ce revirement facilita la mise en place d'une riposte rapide et efficace. La convention de Vienne sur la protection de la couche d'ozone est adoptée en 1985 sous l'égide des Nations unies. En application de cette convention, le protocole de Montréal (1987) planifie le retrait des CFC dont la production diminue massivement à partir de 1990 pour devenir marginale vingt ans après.

Comme les gaz CFC ont une durée de vie de l'ordre de la centaine d'années, leurs rejets dans l'atmosphère avant l'application du protocole de Montréal continueront d'exercer leurs influences environnementales pendant plusieurs décennies. L'UNEP qui assure le secrétariat des accords internationaux sur l'ozone prévoit que la

couche d'ozone ne sera intégralement réparée qu'après 2050. Simultanément, les gaz CFC continueront d'exercer leur pouvoir de réchauffement sur la Planète tant qu'ils n'auront pas été détruits en fin de vie par voie chimique. Il reste que le protocole de Montréal, en tarissant le flux d'entrée, a eu un impact majeur sur les émissions de gaz à effet de serre. Conçu pour endiguer les risques sanitaires immédiats liés aux ultraviolets, il a été à ce jour l'action internationale la plus efficace engagée pour atténuer le réchauffement global<sup>11</sup>.

Ce résultat méconnu a cependant été en partie contrarié par le développement de substituts, appartenant également à la famille des halocarbures, inoffensifs pour la couche d'ozone, mais à effet de serre. Les plus importants de ces gaz – les hydrofluorocarbures (HFC) – ont été mis au point par la société Dupont de Nemours. Ils sont utilisés dans les matériels de climatisation et de réfrigération qui sont des marchés en croissance très rapide dans les pays émergents. Leur contribution à l'effet de serre augmente en conséquence, même si elle est encore loin d'atteindre celle des CFC. Cette progression devrait être contenue dans le futur grâce à l'adoption de l'amendement adopté en 2016 à Kigali qui place ces gaz sous régulation du protocole de Montréal.

Mais nous n'en avons pas terminé avec l'ozone. Si 90 % de l'ozone se trouve dans la stratosphère, 10 % se forme par réaction chimique dans la basse atmosphère. Celle que nous respirons. Pendant que nous affaiblissons la couche d'ozone stratosphérique avec nos rejets de gaz fluorés, nous avons rejeté d'autres substances, les oxydes d'azote ( $\text{NO}_x$ ) et les composés organiques volatiles (COV), qui accroissent, par réaction chimique, la présence de l'ozone dans la basse atmosphère. Or, l'ozone est toxique. Lorsque les seuils limites sont dépassés dans les centres urbains

équipés de systèmes de suivi, les autorités imposent généralement des restrictions de circulation pour limiter les rejets de  $\text{NO}_x$  et de COV. Par ailleurs, l'ozone troposphérique (présent dans la basse atmosphère) est également à effet de serre. D'après le GIEC, il est devenu l'un des contributeurs significatifs à l'accroissement de l'effet de serre. Une deuxième raison pour combattre sa prolifération dans les centres urbains en accélérant la lutte contre les rejets de  $\text{NO}_x$  et de COV.

## **POLLUTIONS LOCALES ET RÉCHAUFFEMENT GLOBAL**

Dans le cas de l'ozone troposphérique, l'action pour atténuer le réchauffement va de pair avec la réduction des pollutions locales. Dans un grand nombre de cas, l'action contre les émissions de gaz à effet de serre génère d'autres bénéfices environnementaux. Cela donne une seconde raison de se mettre en action. C'est heureux, mais hélas pas toujours systématique. On s'en rend compte en examinant le rôle des composés non gazeux de l'atmosphère.

L'atmosphère ne contient pas que des gaz. On y rencontre des masses imposantes de particules liquides ou cristallisées : les nuages qui proviennent de la condensation de la vapeur d'eau. Comme nous l'expérimentons régulièrement, la plupart des nuages réfléchissent une partie des rayons solaires se dirigeant vers la Terre, ce qui contribue à la refroidir. Seuls quelques nuages situés à plus haute altitude, telles les traînées blanches qui se dessinent dans le ciel derrière le passage des avions, contribuent au contraire à son réchauffement en absorbant les rayons infrarouges. Cet effet est cependant loin de compenser l'effet de refroidissement provoqué par le réfléchissement des rayons solaires.



On trouve aussi dans l'atmosphère des particules solides appelées « aérosols ». Comme les nuages, les aérosols réfléchissent une partie des rayons du soleil se dirigeant vers la Terre. Certains sont naturels, comme les sables du Sahara qui peuvent voiler le ciel jusqu'en Europe quand se déchaîne le siroco. Les volcans en éruption rejettent de grandes quantités d'aérosols qui peuvent provoquer une baisse du thermomètre sur plusieurs années. En plus de ces aérosols naturels, les terriens ont envoyé de multiples substances solides qui restent plus ou moins longtemps dans l'atmosphère. À l'exception des suies issues de combustions mal maîtrisées (le *black carbon*), les aérosols contrarient l'action de l'effet de serre, soit directement en réfléchissant une partie des rayons solaires pénétrant dans l'atmosphère, soit indirectement en accroissant la capacité des nuages à le faire. Le cinquième rapport du GIEC estime que les aérosols envoyés par les terriens dans l'atmosphère ont compensé le tiers de l'accroissement anthropique de l'effet de serre<sup>12</sup>.

Ces aérosols sont la cause de pollutions multiples. Les microparticules rejetées par la combustion du bois, du charbon ou du fioul sont invisibles à l'œil nu. Elles génèrent des affections respiratoires et sont capables, pour les plus fines, de franchir les tissus humains et de perturber la circulation sanguine. Les particules soufrées, principalement rejetées par la combustion du charbon et de certains produits pétroliers, provoquent les pluies acides qui détruisent les forêts et génèrent des risques sanitaires importants pour ceux qui y sont exposés. Après-guerre, les rejets de soufre (et d'autres particules) dans l'atmosphère ont été tellement élevés qu'ils ont contrarié l'effet de réchauffement résultant de l'accroissement du stock de gaz à effet de serre. La lutte contre les pluies acides a conduit à désulfurer les combustibles ou à filtrer les rejets de leur

combustion dans les pays développés, ce qui a réduit le stock d'aérosols, mais indirectement contribué au réchauffement. Une partie de ces stocks de polluants se reconstitue néanmoins rapidement dans les pays émergents, surtout en Asie. Leur élimination est une priorité sanitaire. Mais si on élimine ces rejets de particules au nom de la lutte contre les pollutions locales sans simultanément agir sur les sources émettrices de gaz à effet de serre, on accélère le réchauffement. Lutter pour la qualité de l'air que nous respirons ne rime donc pas systématiquement avec atténuation du réchauffement global.

L'atmosphère apparaît ainsi comme un immense laboratoire au sein duquel les rejets des terriens provoquent de multiples réactions en chaîne. Les émissions de méthane, de protoxyde d'azote et de gaz fluorés amplifient directement l'effet de serre. D'autres rejets, comme ceux d'oxydes d'azote ou de composés organiques volatiles, contribuent indirectement à cette amplification par les réactions chimiques qu'ils provoquent (production d'ozone troposphérique à titre principal). Simultanément, cet effet est contrarié par les émissions de particules qui, à l'instar de celles de soufre, provoquent des pollutions locales et régionales, mais contrecarrent le réchauffement en réfléchissant les rayons solaires. Ces multiples réactions accélèrent ou freinent les mouvements de l'horloge climatique dont le ressort principal reste les émissions de  $\text{CO}_2$  à l'origine de deux tiers du réchauffement global d'origine anthropique.

## **LE CYCLE DU CARBONE**

Pour les gaz hors  $\text{CO}_2$ , le passage du flux au stock dépend de leur durée de vie moyenne, fonction de leur processus de destruction en fin de vie sous l'effet du rayonnement solaire. La

durée de ce processus est très variable : relativement courte dans le cas du méthane ou de la plupart des gaz HFC, elle peut atteindre jusqu'à 50 000 ans pour le Tétrafluorure de carbone ( $\text{CF}_4$ ), un gaz à effet de serre heureusement très secondaire.

On est face à un problème classique de passage du flux au stock que des modèles simples permettent de traiter quand on veut, par exemple, anticiper le rythme de renouvellement d'un parc de voitures, ou modéliser en macroéconomie le flux d'investissement à partir du stock de capital (modèle dit de l'« accélérateur » pour les spécialistes<sup>13</sup>). Tous ces modèles révèlent une inertie du stock relativement au flux que nous avons déjà rencontré dans le cas des gaz CFC. Cette inertie est d'autant plus grande que la durée de vie du bien considéré est longue. Prenons l'exemple du protoxyde d'azote dont la durée de vie moyenne est de 121 ans. Supposons que ses émissions augmentent d'un certain pourcentage pendant 121 ans. À partir de la 122<sup>e</sup> année, elles arrêtent brusquement d'augmenter. Il faudra attendre 121 ans pour que le stock se stabilise ! Si les émissions reculent à partir de la 122<sup>e</sup> année, le stock continuera d'augmenter tant que les émissions ne seront pas redescendues sous celles d'un peu plus d'un siècle auparavant. Cette inertie du stock au flux est un paramètre déterminant de l'horloge climatique pour les gaz hors  $\text{CO}_2$ . Mais ceux-ci ne font qu'accélérer ou freiner le mécanisme central de l'horloge, impulsé par le  $\text{CO}_2$ .

Dans le cas du  $\text{CO}_2$ , la mécanique est plus compliquée. Les molécules de  $\text{CO}_2$  circulent en permanence entre différents réservoirs. Ce qu'on appelle le « cycle du carbone ». Nous y participons à chaque instant, au rythme de notre respiration, en inhalant l'oxygène présent dans l'air et en y rejetant du  $\text{CO}_2$ . S'il n'y avait que des mammifères à la surface de la Terre, cet échange

gazeux risquerait fort d'aboutir rapidement à une saturation de l'air en CO<sub>2</sub>, un gaz non toxique mais qui ne pourrait pas se substituer à l'oxygène dans nos poumons. Heureusement, les plantes savent opérer une réaction opposée via la photosynthèse qui capture le CO<sub>2</sub> de l'atmosphère et rejette de l'oxygène. Elles composent, avec les sols qui en fournissent le substrat, l'un des deux puits naturels de carbone.

Le second est constitué des océans dont la surface absorbe le CO<sub>2</sub> qui est soluble dans l'eau, comme l'attestent les bulles dans nos verres d'eau gazeuse. Vu leur surface, on pourrait penser que les océans sont capables d'absorber d'immenses quantités de carbone atmosphérique. Cette capacité est en réalité limitée par les réactions biochimiques qui vont conditionner le transfert des molécules de carbone dissoutes en surface vers les profondeurs où il finira par se transformer en sédiments. Ces processus très complexes sont liés au fonctionnement des écosystèmes marins qui restent mal connus. On sait cependant que l'acidité de l'eau et sa température à la surface des océans sont deux variables qui pourraient limiter, dans le futur, l'efficacité de la pompe à carbone océanique.

Le stock de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère dépend donc, d'une part, de nos émissions de CO<sub>2</sub> dont on a constaté l'empilement séculaire au premier chapitre et, d'autre part, de la capacité des deux puits de carbone naturels à en retirer une fraction de l'atmosphère. Depuis le début de l'ère industrielle, chacun de ces deux puits naturels a retiré environ le tiers de nos émissions cumulées. Le solde, à savoir 40 %, s'est donc accumulé dans le réservoir atmosphérique agissant comme une couverture chauffant la surface de la Planète.

Ce bilan de long terme est régulièrement actualisé par les travaux du Global Carbon Project, un réseau international mobilisant des scientifiques pour approfondir ces questions<sup>14</sup>. Parmi ces

travaux, la publication d'un rapport annuel permet de suivre les différents échanges entre les réservoirs du carbone. Entre 1990 et 2017, dernière année connue, les émissions anthropiques de CO<sub>2</sub> ont atteint de l'ordre de 930 milliards de tonnes de CO<sub>2</sub>. La forêt et les sols en ont absorbé 30 % et l'océan un peu moins de 25 %. Le solde, à savoir 400 milliards de tonnes, s'est accumulé dans le réservoir atmosphérique. C'est lui qui accentue l'effet de serre et alimente le réchauffement global.

Pour limiter la croissance de ce stock, le levier principal consiste à agir sur le flux d'entrée en limitant nos émissions. Son impact sur le stock va être tributaire de la capacité des puits à absorber le surplus de CO<sub>2</sub> atmosphérique. Or, le fonctionnement de ces puits est très complexe. De plus, leur efficacité peut être altérée ou renforcée par l'activité humaine, comme on le détaillera dans la seconde partie de l'ouvrage. Comment dès lors anticiper les effets sur le stock d'un coup de frein (ou d'accélérateur) de nos émissions ? Nous ne pouvons pas utiliser les modèles simples flux-stock basés sur la durée de vie des gaz dans l'atmosphère comme pour les autres gaz à effet de serre. Il nous faut utiliser les résultats de modèles bien plus complexes : les modèles climatiques.

## **RÉTROACTIONS POSITIVES ET NÉGATIVES**

Les modèles climatiques consistent à représenter les multiples interactions entre les variables qui déterminent le climat : échanges d'énergie entrant et quittant l'atmosphère, courants océaniques, formations de nuages, cycle de l'eau et... émissions anthropiques de gaz à effet de serre. Ces modélisations donnent en sortie une description des différents états du climat en résultant : la

température moyenne bien sûr, mais aussi sa distribution, la pluviométrie, les tempêtes, la glace...

Ces modèles permettent en premier lieu d'effectuer le passage du flux des émissions de gaz à effet de serre au stock présent dans l'atmosphère. Pour les gaz hors CO<sub>2</sub>, la variable clé est la durée de vie du gaz. Pour le CO<sub>2</sub>, l'impact du flux d'entrée sur le stock dépend de la capacité d'absorption des puits. Or, cette capacité peut elle-même varier suivant le niveau du stock. Par exemple, l'acidité croissante de l'océan réduit son aptitude à stocker du CO<sub>2</sub> et, *a contrario*, plus de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère favorise la photosynthèse. C'est la raison pour laquelle on a besoin de modèles complexes pour représenter le passage du flux au stock. Leur enseignement principal est limpide. Nos émissions de CO<sub>2</sub> agissent pour longtemps sur le stock atmosphérique. Cela signifie que pour chaque nouvelle génération de terriens, le stock accumulé par les générations précédentes est le premier facteur de réchauffement qu'elle connaîtra. Si cette nouvelle génération parvient à comprimer drastiquement ses émissions, ceci mettra du temps à impacter le stock. Ce sont les générations suivantes qui en verront les principaux effets sur la température.

Une fois le stock de gaz à effet de serre rattaché aux émissions, les modèles permettent de calculer l'impact de la variation du stock sur la température moyenne. Arrhenius avait, le premier, tenté l'exercice en prenant l'hypothèse d'un doublement de la concentration atmosphérique de CO<sub>2</sub>. Il estimait son effet entre 5 et 6 °C. L'usage a été pris de nommer « sensibilité climatique » l'impact d'un doublement du stock atmosphérique de CO<sub>2</sub> sur la température moyenne. Si aucune autre variable du système ne changeait, un tel doublement provoquerait un réchauffement moyen de 1,2 °C. Un chiffre déjà connu par Arrhenius, aussi solidement établi par les lois

de la physique que celle qui attire irrémédiablement la pomme de Newton vers le sol. Mais le système climatique est capricieux. Un tel choc est loin de laisser toutes les autres variables dans leur état initial. Il faut donc tenir compte des rétroactions qui peuvent jouer dans des sens opposés.

Les rétroactions négatives sont des modifications du système qui tendent à amortir le choc provoqué par le doublement du stock. La plus connue est l'accroissement de l'activité de la photosynthèse résultant d'un air plus chargé de  $\text{CO}_2$ . Le mécanisme s'observe bien en conditions expérimentales. Il est toutefois difficile d'en chiffrer l'incidence globale. Le puits de carbone terrestre est sans doute renforcé par deux fois plus de  $\text{CO}_2$  dans l'atmosphère, mais on ne sait pas exactement dans quelles proportions.

Les rétroactions positives amplifient au contraire le choc initial. Elles accroissent la sensibilité climatique qui devient supérieure à l'unité. Les deux plus importantes concernent l'albédo et la vapeur d'eau.

L'albédo est la capacité de réfléchissement d'une surface. Elle joue un rôle important dans l'équilibre thermique de la Planète : plus l'albédo augmente, moins la Terre absorbe de chaleur et réciproquement. Lorsque la température moyenne réchauffe, la neige et la glace fondent. Sur terre, cela découvre de vastes étendues situées dans les hautes latitudes qui réfléchissent moins bien les rayons solaires. Sur mer, cela transforme une partie de la banquise en une masse sombre d'eau. Cela ouvre la perspective de nouvelles lignes transcontinentales pour les compagnies maritimes, mais renforce la capacité de l'océan à retenir la chaleur. L'albédo de la Planète est significativement réduit par la fonte des neiges et des glaces, ce qui accélère le réchauffement global.

L'autre rétroaction positive concerne la vapeur d'eau. Plus de chaleur, c'est plus d'évaporation des eaux de surface et plus d'évapotranspiration des plantes et des sols. Cet accroissement de la vapeur d'eau est la principale rétroaction positive qui accroît la sensibilité climatique. Elle est particulièrement difficile à calculer, car le pouvoir de réchauffement de la vapeur d'eau diffère fortement suivant l'altitude à laquelle elle se trouve. Qui plus est, une partie de ce surplus de vapeur d'eau est susceptible de se condenser quand elle s'élève en se transformant en nuages. Dans ce cas, la rétroaction positive peut muter et devenir négative : difficile métier que celui de la modélisation climatique !

Les rétroactions positives ne doivent pas être confondues avec ce que les climatologues appellent les « surprises climatiques ». Les mauvaises surprises devrait-on préciser. Il s'agit de processus pouvant entraîner un véritable emballement du réchauffement : l'inversion de la circulation thermohaline figurée à la façon d'Hollywood dans le film *Le jour d'après*, le dégazage des fonds marins et/ou du permafrost qui contiennent des quantités gigantesques d'hydrate de méthane ou encore l'assèchement brutal de la forêt amazonienne. Ces surprises ne sont pas intégrées dans les rétroactions positives permettant d'estimer la sensibilité climatique.

Au total, les rétroactions positives l'emportent sur les négatives, mais leur ampleur diffère suivant les modèles. On est donc certain qu'un doublement de la concentration atmosphérique de  $\text{CO}_2$  engendre mécaniquement un réchauffement supérieur à 1,2 °C. Mais il y a incertitude sur le chiffre exact qu'il faut ajouter. Le cinquième rapport du GIEC a fait la synthèse des calculs effectués par les modèles climatiques existants : la valeur centrale est de



3,2 °C, comprise dans la fourchette de 2 à 4,5 °C<sup>15</sup>. Sa frontière supérieure est donc voisine de l'estimation basse d'Arrhenius.

## **LES FUTURS POSSIBLES**

L'immense majorité des gens, auteur de ces lignes compris, est incapable de faire fonctionner les modèles climatiques qui font appel à des capacités de calcul monstrueuses et à des montagnes de données. Le GIEC fournit heureusement à intervalles réguliers des synthèses sur l'état de la connaissance en la matière. Le GIEC n'est pas un laboratoire de recherche, mais un réseau de scientifiques mis en place en 1988 sous l'égide de deux agences des Nations unies pour fournir des rapports d'évaluation sur l'état des connaissances en matière de changement climatique. Il répertorie l'ensemble des études réalisées à partir des modèles climatiques et surtout demande aux différentes équipes de modélisation de simuler ce que donnent leurs modèles à partir d'hypothèses harmonisées.

Dans le cinquième rapport d'évaluation du GIEC, rendu public un an avant la conférence de Paris sur le climat (décembre 2015), on trouve une information très riche sur les trajectoires possibles d'émission, regroupées en quatre familles de scénarios. Les images de la température moyenne qui s'en dégagent montrent l'étendue des futurs possibles en fonction de nos choix d'aujourd'hui. Durant les premières décennies, entre 2010 et 2035, les courbes de températures se confondent pratiquement. Ce sont nos émissions historiques qui restent déterminantes. Le climat que nous y connaissons est déjà joué. Ce n'est qu'à partir de 2050 que les courbes divergent fortement. Quatre futurs possibles se dessinent :

Si nous comprimons drastiquement nos émissions de CO<sub>2</sub>, un réchauffement compris entre 1,5 °C et 2 °C relativement à l'époque

préindustrielle reste possible, avec une concentration de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère stabilisée à 450 ppm avant la fin du siècle et qui décline ensuite. Le réchauffement aura été une caractéristique majeure du xx<sup>e</sup> siècle, mais les terriens l'auront endigué en quelques générations. Par rapport aux tendances lourdes de l'empilement des sources fossiles décrites au [chapitre 1](#), c'est une rupture historique totalement inédite.

À l'autre extrême, la poursuite de la logique de l'empilement conduit à des températures moyennes dépassant 4 °C relativement à l'ère préindustrielle d'ici la fin du siècle et une concentration de CO<sub>2</sub> supérieure à 900 ppm, aucune des deux variables n'étant stabilisée. Un scénario dans lequel la cinquième transition énergétique ne se déclencherait pas malgré tous les signes avant-coureurs.

Entre ces images extrêmes, deux états intermédiaires figurent des scénarios de sortie des énergies fossiles étalés dans le temps, dans la continuité des transitions énergétiques du passé. Dans les deux cas, le réchauffement moyen dépasse 2 °C à la fin du siècle et se poursuit au siècle suivant. Dans le premier, le monde se dirige vers un doublement du stock de CO<sub>2</sub> atmosphérique provoquant un réchauffement moyen de l'ordre de 3 °C à terme. Dans le second, la stabilisation du stock de CO<sub>2</sub> est plus lointaine et le réchauffement plus élevé.

Ces projections sont bien connues. Elles ont une implication souvent sous-estimée pour les décideurs politiques. Si la transition bas carbone s'accélère en mordant sérieusement sur les flux annuels d'émission, il faudra expliquer aux citoyens que les résultats de leurs efforts n'apparaîtront que plus tard sur la courbe de température. Bien après l'expiration de leurs mandats électoraux ! *A contrario*, si nous tardons à amorcer la transition bas carbone,

inévitables à terme, les retombées sur la température moyenne se feront sentir bien au-delà du siècle.

Ces projections révèlent également que les choix ne sont pas binaires, comme pourrait le laisser croire l'opposition systématique entre les deux scénarios extrêmes. Ce type de présentation, souvent retenue par les auteurs du GIEC, a la vertu de montrer les mondes si différents où nous conduisent l'action précoce d'un côté, la fuite en avant de l'autre. Mais l'opposition entre ces deux images polaires risque de nous enfermer dans des dilemmes désespérants, comme s'il n'y avait aucun futur possible entre le 2 °C et l'effondrement total, entre le volontarisme qui déplace tous les obstacles et la spirale du renoncement. Il faut donner toute leur place aux scénarios intermédiaires qui ne sont pas de simples repoussoirs, mais font partie des futurs possibles, même s'ils ne sont pas désirables.

## **LE TEMPS QUI PASSE, LE TEMPS QU'IL RESTE**

Parmi les utilisations des modèles climatiques, les rédacteurs du cinquième rapport du GIEC ont introduit une innovation intéressante : le calcul d'un « budget carbone global » défini comme le cumul des émissions de CO<sub>2</sub> donnant deux chances sur trois d'atteindre un objectif donné de limitation du réchauffement (1,5 °C, 2 °C ou encore 3 °C). Lisons attentivement ce qu'ils nous disent : « Les résultats de l'ensemble des modèles montrent que limiter le réchauffement global d'origine anthropique (en prenant en compte à la fois le CO<sub>2</sub> et les autres incidences anthropiques) à moins de 2 °C relativement à la période 1861-1880, avec une probabilité supérieure à deux tiers, impliquerait que le cumul de l'ensemble des émissions d'origine anthropique depuis 1870 soit limité à 2 900 milliards de tonnes de CO<sub>2</sub>. Environ 1 900 milliards de tonnes ayant déjà été

émises jusqu'en 2011, cela laisse environ 1 000 milliards de tonnes compatibles avec l'objectif<sup>16</sup>. »

Bien entendu, ce chiffre de 2 900 milliards est une valeur centrale, autour de bornes relativement larges (2550-3150). Il dépend de multiples hypothèses, largement discutées dans le rapport, sur les capacités futures d'absorption des puits de carbone et sur la contribution des gaz hors CO<sub>2</sub>. L'ordre de grandeur reste utile. Il nous permet de suivre les aiguilles de l'horloge climatique indiquant le temps qui passe et le temps qu'il reste pour viser l'objectif des 2 °C.

En 1870, nos ancêtres émettaient de l'ordre de 3 milliards de tonnes de CO<sub>2</sub>, principalement rejetées par la déforestation. À ce niveau, il leur restait 888 ans pour épuiser le budget carbone global. En 1903, au moment de la remise du Nobel à Arrhenius, les terriens n'avaient consommé que 6 % du budget carbone global. Il leur restait 409 ans pour l'épuiser à niveau d'émission inchangé.

À cette époque, même si nous avons franchi les premiers pas vers l'Anthropocène, aucun responsable politique ou économique n'en avait conscience. Pas même Arrhenius, l'un des rares terriens à avoir alors entendu parler de l'effet de serre, et plutôt déçu que le réchauffement attendu ne se produise pas plus rapidement. Mais le temps qui passe, ce sont aussi les atteintes environnementales qui se multiplient, surtout avec l'exubérance de la croissance de l'après-guerre. Les alertes ne vont pas tarder à se multiplier.

En 1962, l'ouvrage de Rachel Carson *Silent Spring* a un impact considérable aux États-Unis. Il joue un rôle clé dans le développement du mouvement environnementaliste et conduit rapidement à la réglementation puis l'interdiction du DDT. Un quart du budget carbone mondial est alors consommé, ce qui laisse 137

années pour conserver deux chances sur trois de limiter le réchauffement à 2 °C.

Nouvelle alerte avec la publication par le club de Rome du rapport *Limits to Growth* (bizarrement traduit en français par « Halte à la croissance »). La même année, la problématique de l'environnement entre aux Nations unies avec la conférence de Stockholm, premier sommet mondial du genre. Nous sommes alors en 1972. Un tiers du budget carbone a été consommé, ce qui nous laisse encore 96 ans.

1992, Sommet mondial de la Terre à Rio. Depuis Stockholm, le rendez-vous est décennal. La Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques est adoptée : le traité international de référence sur le climat qui entrera en vigueur en 1994. L'objectif de stabilisation du stock de CO<sub>2</sub> est explicitement mentionné dans le préambule et un cadre de négociation est défini. Les terriens ont alors pratiquement consommé la moitié du budget mondial. Temps restant pour viser les 2 °C à émission inchangée : 55 ans !

La négociation internationale qui s'enclenche semble n'avoir guère de prise sur les aiguilles de l'horloge climatique. Le temps qu'il reste continue à se rétracter. Le mouvement semble inexorable, comme le resserrement des murs qui emprisonne les personnages à la fin de *L'Écume des jours*, le beau roman de Boris Vian<sup>17</sup> : 44 ans à la signature du protocole de Kyoto (1997) ; 26 ans lors de la conférence de Copenhague (2009) qui échoue à lui trouver un successeur ; 17 ans lorsqu'est plébiscité, dans un grand élan œcuménique, l'accord de Paris sur le climat (2015). Parmi tous les décideurs – chefs d'État, ministres, dignitaires de la société civile – qui applaudissent à la retombée du marteau sur l'estrade, combien ont conscience que le troisième quart du budget carbone global vient

juste d'être consommé ? Il a fallu 90 ans pour consommer le premier quart, 34 ans pour le second, 21 ans pour le troisième.

Le calcul du budget carbone global a été actualisé en 2018, dans le cadre du rapport spécial du GIEC étudiant les implications d'un objectif de réchauffement moyen limité à 1,5 °C. Des modélisations plus complètes ont conduit à une révision en légère hausse du budget carbone. Pour avoir deux chances sur trois de contenir le réchauffement en dessous de 1,5 °C, il faudrait limiter le cumul des émissions de CO<sub>2</sub> depuis 1870 aux alentours de 2 700 milliards de tonnes<sup>18</sup>. À rythme inchangé d'émission de 2018, ce budget serait épuisé en une décennie à peine. Pour un objectif de 2 °C, l'épuisement interviendrait en un peu plus de deux décennies. Dans les deux cas, le temps est compté.

## **INCERTITUDE ET ACTION**

L'emballlement de l'horloge climatique alors même que se succèdent rapports, sommets, traités et déclarations en tous genres depuis un quart de siècle peut surprendre. Grâce au GIEC et à l'implication des chercheurs qui y contribuent, le réchauffement climatique est probablement l'une des questions scientifiques les mieux documentées.

Malgré cette information, désormais largement médiatisée, le passage à l'action semble sans cesse retardé. C'est vrai des gouvernements, plus enclins à signer des déclarations d'intention générales qu'à prendre des mesures concrètes, mais aussi des citoyens qui ont toujours d'excellentes raisons pour reporter au lendemain les changements de comportement qui les dérangent. Cette résistance au changement est parfois mise sur le compte des incertitudes qui subsisteraient dans le diagnostic des scientifiques.

Leur message est pourtant sans ambiguïté en la matière. Écoutons, avant de clore ce chapitre, deux des plus éminents climatologues.

Professeur de physique de l'atmosphère à l'université d'Oxford, John Houghton a été le patron de la Météo britannique et a joué un rôle clé dans les premiers rapports d'évaluation du GIEC. Dans son ouvrage de référence *Global Warming. The Complete Briefing*, ses propos sont limpides : « Le système climat pourrait être plus vulnérable aux perturbations que nous ne l'avons généralement pensé. En ce qui concerne les changements climatiques futurs, il ne serait pas prudent d'ignorer la possibilité de surprises... Ce n'est pas le changement climatique qui est incertain. Les incertitudes qui doivent être évaluées concernent l'amplitude du changement et sa distribution spatiale détaillée<sup>19</sup>. » D'après Houghton, l'incertitude portant sur les réactions du système climatique au choc de nos émissions peut jouer dans les deux sens. Elle ne réduit en aucune façon le risque climatique. Elle l'accroît au contraire, dans des proportions considérables, en cas de « mauvaises surprises ».

Autre figure marquante du GIEC : Jean Jouzel qui dirigea l'Institut Pierre-Simon-Laplace, peut-être mieux connu des lecteurs de langue française. Dans *Le défi climatique* coécrit avec Anne Debroise, Jouzel évoque aussi les potentielles mauvaises surprises : « Au-delà des conséquences du changement climatique que nous avons évoquées, inertie du système et surprises climatiques ajoutent donc à la nécessité de stabiliser l'effet de serre, rapidement, et à un niveau le plus bas possible<sup>20</sup>. » Même conclusion que Houghton : pour les scientifiques du climat, la prise en compte de l'incertitude ne peut en aucune façon justifier l'attentisme ; elle incite au contraire à l'accélération de l'action.

## CHAPITRE 3

# LE TEMPS QU'IL FERA

Les terriens ont aujourd'hui étendu leur habitat à la plupart des espaces émergés de la Planète. Dans leur atlas historique de la population mondiale, Colin McEvedy et Richard Jones nous rappellent que leur répartition actuelle résulte de multiples migrations, très liées aux climats du passé<sup>1</sup>. Des espaces vides ont été colonisés par l'espèce humaine qui a privilégié la proximité des fleuves et/ou de la mer pour se regrouper en communautés de plus en plus denses. Ces communautés sont devenues des villes, mutant parfois en métropoles démesurées. Aujourd'hui, plus d'un humain sur deux habite en ville et près de deux sur trois à proximité de la mer ou d'un fleuve. Une grande inconnue sera l'impact du réchauffement global sur ces distributions spatiales de populations.

Commençons le chapitre par la visite d'un territoire au climat parmi les plus inhospitaliers du globe : le Sahara. Nous y rencontrons des formes traditionnelles d'adaptation à la rudesse du climat très remarquables. On y trouve aussi de nouvelles colonies humaines, notamment pour l'exploitation pétro-gazière, qui construisent de minuscules îlots de modernité entourés d'espaces vides et silencieux. Deux types d'adaptation, aux impacts bien



différents, dont il est difficile de prévoir lequel sera le plus résilient au durcissement des conditions climatiques.

Même dans les scénarios les plus extrêmes, toute la Terre ne connaîtra pas demain le climat saharien d'aujourd'hui ! Au terme de notre périple dans le désert, nous écoutons ce que nous disent les scientifiques du temps qu'il fera demain : un réchauffement plus fort sur terre que sur mer et très marqué dans les hautes latitudes ; de nouveaux régimes de précipitations affectant le cycle de l'eau ; le niveau des mers qui s'élève et des événements extrêmes d'une intensité croissante. Quelques opportunités pour certains, mais globalement beaucoup de risques supplémentaires.

Du fait de la vitesse des changements climatiques en cours, les écosystèmes peinent à s'adapter. Dépourvus d'organes moteurs, les végétaux ne peuvent déplacer leur lieu d'implantation que très lentement : ils meurent s'ils ne parviennent plus à s'adapter. Les animaux peuvent migrer plus rapidement. Leurs déplacements sont freinés par les infrastructures humaines et génèrent d'autres déséquilibres pouvant s'avérer fatals. Le réchauffement va ainsi amplifier la perte de la biodiversité.

Le degré de vulnérabilité des sociétés humaines varie considérablement suivant les territoires considérés et les échelles de temps retenues. La cartographie globale de ces vulnérabilités est singulière : les changements du climat risquent de frapper plus durement les sociétés les moins engagées sur le chemin du développement : celles qui ont le moins contribué au réchauffement.

Face au réchauffement, les terriens disposent de connaissances et de moyens techniques sans commune mesure avec les autres espèces vivantes. Cela devrait démultiplier leur capacité d'anticipation pour identifier les risques futurs et mieux s'y préparer. C'est tout l'enjeu de l'« adaptation au changement climatique ».

Nous examinons en fin de chapitre ce pilier des politiques climatiques, souvent remisé au second rang des priorités. Conduites en fonction des conditions locales, les démarches d'adaptation visent à renforcer la résilience de nos sociétés face aux risques climatiques.

## **VIVRE AU SAHARA**

Le Sahara est le plus grand désert du monde. Il couvre un espace équivalent à 14 fois la France avec 1/10<sup>e</sup> de sa population. Le voyageur qui s'écarte des axes de communication découvre des étendues vides et un silence absolu quand le vent ne souffle pas. Il a l'impression qu'il n'y a pas âme qui vive dans un tel environnement. Des sociétés se sont pourtant adaptées depuis fort longtemps à l'aridité du climat. Effectuons une petite boucle au sein de ce milieu fascinant.

Nous avons laissé les artères encombrées d'Alger avec leurs concerts de klaxon et quittons Sétif, la grande agglomération située sur les hauts plateaux séparant le Tell du Sahara. Nous avons la chance d'être fin avril, durant le court intermède printanier où éclôt une végétation colorée qui sera bientôt brûlée par les chaleurs estivales. Les alignements de palmiers dattiers nous annoncent Biskra, l'antichambre du désert.

Nous pénétrons dans le Grand Erg oriental. Des dunes immenses aux multiples plissures creusées par l'érosion s'étendent des deux côtés de la route. Avec la lumière déclinante du soir, elles semblent jouer avec le soleil. Les coupoles des maisons d'El Oued, notre première étape saharienne, se fondent dans ces jeux d'ombre et de lumière. El Oued fut fondée au XII<sup>e</sup> siècle par des voyageurs qui descendaient de Syrie et choisirent ce lieu à cause de l'oued,

sec la plus grande partie du temps, mais qui communique avec une nappe phréatique permettant d'alimenter la palmeraie. L'architecture des maisons, sans ouvertures extérieures et aux coupoles réfléchissantes, constitue un refuge efficace face aux températures caniculaires. Le thermomètre dépasse couramment 40 °C l'été. La grande place d'El Oued est vide aux heures chaudes de la journée et ne s'anime vraiment qu'après le coucher du soleil. El Oued fut pendant longtemps une étape pour les caravanes, dont témoigne encore le marché hebdomadaire aux dromadaires, le premier d'Algérie<sup>2</sup>. On y échange surtout des animaux pour la boucherie, car le nomadisme, une forme ancestrale d'adaptation au milieu par déplacement des hommes et des troupeaux, a pratiquement disparu de cette partie du Sahara<sup>3</sup>.

L'eau et les hommes. Les systèmes hydrauliques mis au point par les Mozabites, une communauté d'origine berbère présente depuis le xi<sup>e</sup> siècle au Mzab, permirent de sédentariser les hommes. Nous approchons de Ghardaïa, la ville la plus peuplée du Mzab. Des rochers aux couleurs ocres ont remplacé les dunes de sable. Ils forment une croute impénétrable. Lorsqu'arrive une précipitation, les lits des oueds sont brusquement envahis par des flots, souvent très dangereux. L'eau ruisselle en surface pour se perdre dans les étendues désertiques. Le génie mozabite consista à la domestiquer. En quittant la nationale, nous devons nous soumettre à un contrôle de militaires avant de descendre vers la ville. Leur présence rappelle que le Sahara est devenu un lieu d'insécurité, surtout pour les migrants en chemin vers la Méditerranée. La violence éclate aussi sporadiquement entre communautés sédentarisées. Elle a fait plusieurs dizaines de morts dans cette oasis aux apparences si paisibles.

Les maisons mozabites, avec leurs murs chaulés à blanc et leurs savants encastremements de pièces conduisant à la terrasse, sont des trésors d'inventivité architecturale pour contrer la chaleur. Elles s'empilent le long des collines, mais aussi dans la palmeraie qui, dans le Mzab, est habitée. Le système hydraulique date de sept siècles<sup>4</sup>. Il repose sur deux barrages en amont qui retiennent l'eau et freinent son écoulement grâce à un ingénieux système de vannes en forme de peignes géants filtrant l'eau. À leur sortie, l'eau est répartie dans trois canaux souterrains, les foggaras, débouchant, à quelques kilomètres, sur la palmeraie dont nous parcourons les allées étroites. Ces allées servent de canaux distribuant l'eau, sitôt qu'il pleut ou que l'oued est en crue. De petites fentes sur les murs latéraux, aux largeurs soigneusement étudiées, permettent à chaque parcelle de recevoir une partie des eaux d'écoulement. À l'intérieur des jardins, l'eau est distribuée à l'aide de seguias, conduites également munies de peignes qui répartissent l'eau sur les parcelles et facilitent son infiltration et sa récupération ultérieure à l'aide de puits. Un tel système technique repose sur une organisation sociale rigoureuse et sophistiquée. Les droits et les obligations de chacun sont définis par l'assemblée des Oumanas et basés sur un principe d'égalité d'accès à la ressource hydrique.

En reprenant la route du nord, nous croisons des camions aux couleurs de la Sonatrach, la société pétro-gazière nationale. Le gisement d'Hassi R'Mel, principale réserve en gaz naturel du pays, est à moins de 100 km au nord de Ghardaïa. Un important complexe gazier y opère 24 h/24. Nous ne pourrions pas nous y rendre en raison des consignes drastiques de sécurité. Pour attirer les ingénieurs et techniciens, des bases de vie sont aménagées dans ce type de complexe. On y reproduit, avec force de climatisation, de prélèvements par pompage dans les nappes phréatiques et

d'approvisionnements alimentaires souvent aériens, des cadres de vie artificiels dotés de tout le confort « moderne ». L'empreinte environnementale de ce type d'adaptation est évidemment sans commune mesure avec celle des modes d'adaptation traditionnels du Mزاب.

En quittant l'Algérie depuis l'aéroport d'Oran, nous survolons le complexe gazier d'Arzew d'où le gaz d'Hassi R'Mel est expédié, après liquéfaction, vers l'Europe. Le spectacle est envoûtant avec les multiples points lumineux et les flammes des torchères qui s'élèvent dans la nuit. Notre escapade saharienne pose bien des questions. Les systèmes hydrauliques traditionnels ne constituent pas que des actifs du passé : ils continuent de jouer un rôle important dans l'adaptation des peuples sédentarisés aux rigueurs du climat saharien<sup>5</sup>. Ils sont déstabilisés par l'afflux de populations que génère le développement et par l'usage des motopompes qui perturbent les cycles hydriques (épuisement des nappes superficielles et salinisation des sols). Mais les bases de vie liées aux industries extractives, si gourmandes en ressources et prélevant allègrement sur le milieu, constituent-elles des adaptations plus durables aux rigueurs du climat saharien ?

## **OÙ ÇA CHAUFFE ?**

Même dans les scénarios climatiques les plus extrêmes, peu de régions connaîtront demain les températures qu'affrontent aujourd'hui les habitants des oasis ou les travailleurs des complexes pétro-gaziers du Sahara. Les terriens s'orientent vers une température moyenne qui se situera à la fin du siècle quelque part entre les valeurs extrêmes des scénarios du GIEC. Si on est dans le bas de la fourchette (réchauffement de 1,5 à 2 °C relativement aux

moyennes préindustrielles), nous serons dans un scénario de stabilisation. Plus nous approcherons du haut de la fourchette (réchauffement de 4 °C et au-delà) et plus la perspective de stabiliser la température au siècle suivant s'éloignera.

Mais le réchauffement moyen est une notion bien abstraite. Les modèles climatiques permettent de la décliner géographiquement. Il en ressort en premier lieu que le réchauffement est plus rapide sur terre que sur mer. Quand on évoque un réchauffement de 2 °C, il faut ainsi entendre une hausse du thermomètre de 2,8 °C (40 % de plus que la moyenne) sur les terres émergées, là où nous vivons. Ce réchauffement ne sera pas uniforme : il tendra à être de plus en plus marqué à mesure qu'on s'approche des hautes latitudes. Dans la zone arctique, il est trois fois plus rapide que la moyenne, ce qui préoccupe beaucoup les glaciologues.

Autre caractéristique, le réchauffement n'est pas identique suivant les saisons. En Europe, on prévoit qu'il sera plus fort en hiver à mesure qu'on chemine vers le nord et qu'au contraire on réchauffera plus, en été, du côté de la Méditerranée. On en voit immédiatement les conséquences : au nord, un allongement des périodes de dégel du continent qui pourrait multiplier les problèmes (fonte du permafrost) et, au sud, des risques caniculaires aggravés. Ces écarts entre saisons s'atténuent à mesure qu'on s'approche des zones tropicales.

En France, l'année la plus chaude jamais observée (jusqu'en 2018) a été 2018, avec une hausse du thermomètre de 1,4 °C relativement à la période 1981-2010, la base de référence retenue par Météo France<sup>6</sup>. Relativement à l'époque préindustrielle, cela correspond à un réchauffement de l'ordre de 2,5 °C. La hausse du thermomètre est plus lente le long de la façade atlantique, particulièrement en Bretagne et dans le Sud-Ouest. Elle est plus

marquée lorsqu'on se déplace vers l'est avec l'atténuation de l'influence océanique.

Sous la conduite de Jean Jouzel, un travail de projection a été réalisé en 2015 pour traduire à l'échelle française les scénarios de référence du GIEC<sup>7</sup>. Il donne des images des climats qu'il fera d'ici 2050 puis d'ici 2100. Beaucoup de constantes apparaissent : le thermomètre s'élève dans tous les cas et aucune partie du territoire métropolitain n'est épargnée. D'ici 2050, les écarts entre scénarios sont modestes. Ils se creusent ensuite à mesure que les modèles prennent en compte les effets décalés des changements de trajectoires d'émission. La façade est du pays est toujours plus affectée, avec les hausses les plus fortes attendues dans les Alpes et en Alsace. Le réchauffement pourrait être nettement plus prononcé en été qu'en hiver.

Sur ce dernier point, il n'y a pas totale convergence entre les deux modèles utilisés : celui de Météo France et celui de l'Institut Pierre-Simon-Laplace. Lorsqu'on cherche à anticiper à l'échelle locale les climats de demain, il faut en effet intégrer deux types d'incertitudes : celle, plus générale, du scénario d'émission retenu ; celle de la traduction, grâce aux modèles, de ce scénario global à la maille territoriale.

## **LE CYCLE DE L'EAU**

L'image du réchauffement est souvent associée, dans notre perception, à une planète aride, avec des plantes qui se dessèchent et des animaux squelettiques qui finissent par mourir de soif. Notre récent voyage au Sahara n'a fait qu'amplifier cette perception totalement erronée.

Plus de chaleur qui revient vers la Planète du fait de l'effet de serre, c'est également plus d'évaporation à la surface des océans et plus d'évapotranspiration sur les terres émergées. Contrairement au CO<sub>2</sub>, cette vapeur d'eau additionnelle ne s'accumule pas dans l'atmosphère. Elle va s'intégrer dans le cycle naturel de l'eau en accroissant la quantité globale de précipitations. Le réchauffement moyen nous conduit donc vers une Planète où les climats seront globalement plus humides, mais avec des contrastes saisissants entre zones géographiques. Trois dynamiques principales peuvent être retenues.

- Dans les hautes latitudes et sur la plus grande partie des zones tropicales, les précipitations, déjà abondantes, vont augmenter à certaines périodes de l'année. Ce phénomène est déjà à l'œuvre en Europe septentrionale où les épisodes de fortes précipitations se sont accrus, provoquant parfois des inondations au moment où on ne les attendait pas.
- Dans une grande partie des zones subtropicales, les modèles indiquent au contraire une diminution des précipitations, particulièrement marquée en été. Ces projections décrivent une amplification des épisodes de stress hydrique déjà perceptible des deux côtés de l'équateur : pourtour méditerranéen, Mexique et Californie pour l'hémisphère nord ; Australie et Afrique australe pour l'hémisphère sud. Dans toutes ces zones, le réchauffement global aggrave le manque d'eau.
- Le régime des moussons devrait enfin subir des influences contradictoires qui risquent de perturber le calendrier et le régime des pluies. Les modèles n'en fournissent pas une description convergente.

Comme pour les températures, les changements de régime des précipitations sont assez voisins dans les différents scénarios



d'émission jusqu'en 2050. Ils présentent ensuite des profils d'autant plus contrastés qu'on s'éloigne des scénarios de stabilisation de la température d'ici la fin du siècle.

Dans le cas de la France, les modèles prévoient d'ici 2050 un accroissement des précipitations moyennes en été comme en hiver, avec une grande incertitude sur leur distribution géographique. Le changement des régimes de précipitation s'accroît ensuite fortement dans les scénarios où le réchauffement est le plus fort. Ils conduisent à des images contrastées que les modèles peinent à décrire de façon totalement convergente. Une constante est l'augmentation des épisodes estivaux à fort déficit de précipitation au sud, avec des risques accrus de canicule et d'incendies en perspective.

Un grand nombre de risques provoqués par le réchauffement moyen sont liés au cycle de l'eau.

- En premier lieu, les effets d'un même épisode caniculaire sur l'organisme humain sont différents suivant le taux d'humidité dans l'air. Nos organismes résistent mieux aux fortes chaleurs lorsque le climat est sec, comme au Sahara<sup>8</sup>. Mais les modèles nous promettent globalement à la fois plus de chaleur et plus d'humidité !
- En second lieu, les changements de pluviométrie vont affecter les régimes des fleuves dont les bassins versants s'alimentent grâce aux pluies. Cette perturbation s'ajoutera à un autre effet du réchauffement : la fonte des glaces et du couvert neigeux en amont qui régulent les débits des fleuves prenant leur source dans les massifs montagneux. Il en résulte des risques de crues ou d'étiages aggravés, particulièrement aigus pour les fleuves asiatiques prenant leur source dans l'Himalaya.

- Enfin, le cycle de l'eau est directement lié au fonctionnement de la plupart des écosystèmes terrestres et, par voie de conséquence, aux activités humaines qui en dépendent le plus directement comme l'agriculture ou la gestion forestière.

Les perturbations du cycle de l'eau contribuent également à la montée du niveau de la mer, probablement l'un des risques résultant du réchauffement global le plus difficile à parer à long terme.

## **LA MONTÉE DU NIVEAU DE LA MER**

Lorsqu'on étudie les cycles longs de glaciation-déglaciation, on constate que la quantité d'eau douce bloquée dans les glaces est une variable clé pour comprendre les modifications du niveau de la mer. Lors du dernier pic de glaciation, nous l'avons vu, la mer était plus basse d'environ 100 m relativement à son niveau actuel. Les calottes glaciaires descendaient alors bien plus bas qu'aujourd'hui, immobilisant des quantités considérables d'eau douce qui n'atteignaient plus les océans.

Potentiellement, la libération de toute l'eau douce retenue dans les glaces dans le monde aboutirait à une hausse du niveau de la mer de l'ordre de 70 m : 2 m pour les glaciers continentaux ; 7 m pour le Groenland ; 60 m pour l'Antarctique. Les glaciologues nous disent qu'une telle perspective à l'horizon d'un siècle n'est pas vraisemblable. En revanche, une fois démarré, le processus de fonte de la calotte glaciaire est assez irréversible et peut s'étaler sur plusieurs dizaines de siècles, voire plusieurs millénaires.

Le réchauffement global a provoqué une hausse de 20 cm du niveau de la mer entre 1901 et 2010, le rythme s'étant accéléré sur la période récente. Cette hausse est loin d'être uniforme, car elle est affectée par le taux de salinité, les températures et les courants des

océans. Elle s'ajoute souvent à des paramètres locaux qui peuvent l'amplifier ou l'atténuer (dépôts de limon, affaissement des côtes, etc.). Pour l'essentiel, cette hausse résulte du mécanisme de dilatation : le réchauffement de la surface de l'eau provoque sa dilatation, comme l'action du soleil sur les voies de chemin de fer.

D'après le cinquième rapport du GIEC, la dilatation restera la cause majeure et non réversible à court terme de la hausse du niveau de la mer d'ici la fin du siècle, avec une contribution restant limitée de la fonte des glaces continentales et du Groenland. On atteint ainsi, suivant les scénarios, une fourchette de hausse de 40 cm à 1 m en 2100 qui posera de nombreux problèmes dans les parties plates et habitées du littoral. D'après le rapport plus récent du GIEC, limiter le réchauffement moyen à 1,5 °C réduirait de 10 cm la montée des océans d'ici la fin du siècle relativement à un scénario à 2 °C, épargnant les risques de submersion à environ 10 millions d'habitants des zones littorales. Dans tous les cas, la hausse se poursuivrait au <sup>xxi</sup><sup>e</sup> siècle.

Ces hypothèses sont considérées comme « prudentes » par de nombreux glaciologues qui observent une accélération de la fonte du Groenland et une fragilisation accrue de l'Antarctique Ouest. C'est aussi l'opinion de James Hansen, figure engagée de la communauté scientifique, qui dirigea jusqu'en 2013 le Goddard Institute for Space Studies (GISS) de la Nasa. Hansen fut l'un des premiers à tirer la sonnette d'alarme sur les risques climatiques, notamment lors de son audition de 1988 devant le Sénat américain qui marqua les esprits. Hansen est convaincu que l'objectif de limiter le réchauffement à 2 °C est insuffisant. Dans un papier écrit avec de nombreux coauteurs, il soutient que les scénarios du GIEC, compatibles avec un réchauffement de l'ordre de 2 °C, ne réduisent

pas suffisamment la probabilité d'une hausse de plusieurs mètres du niveau de la mer d'ici 50 à 150 ans<sup>9</sup>.

S'il y a bien incertitude sur la vitesse de la montée des mers, sa réalité ne fait aucun doute. L'anticiper est un impératif, car de très nombreux terriens sont vulnérables. Songeons aux multiples métropoles qui, à l'image de New York, de Shanghai ou du Caire, ont utilisé les bandes côtières planes pour empiler de plus en plus de population.

## **LES ÉVÉNEMENTS EXTRÊMES**

La prise de conscience du risque climatique s'effectue souvent lors d'événements extrêmes dont la gravité peut être amplifiée par le réchauffement global. Les raz-de-marée ont par exemple toujours existé, mais leur ampleur augmente à mesure que le niveau de la mer s'élève à la suite du réchauffement. L'intensité des ouragans en Atlantique Nord semble également s'accroître.

Les réassureurs ont depuis longtemps constitué des observatoires de ces catastrophes naturelles dont le coût pourrait devenir fatal pour les compagnies d'assurance les plus solides. Celui de Swiss Re fournit un diagnostic sans appel : le nombre des catastrophes naturelles répertoriées a été multiplié par quatre entre 1970 et 2017. Celui des victimes oscille fortement d'une année à l'autre. Les pays pauvres comme Haïti ou le Bangladesh payent, de loin, le plus lourd tribut en termes de vie humaine à la suite de tempêtes tropicales ou de tremblements de terre. Le coût de ces événements extrêmes s'accroît. Il se focalise sur les pays riches où la valeur des actifs détruits est plus élevée. Ce suivi conduit le réassureur aux conclusions suivantes dans son rapport paru en 2018 : « Avec le réchauffement de la Planète, il est probable que les

événements associant fortes précipitations et vents deviennent plus fréquents. Il en va de même des événements associés à une grave onde de tempête, compte tenu de l'élévation du niveau des mers. Afin de promouvoir la résilience sociétale, d'autres recherches sur le clustering des ouragans et l'impact du réchauffement climatique sur la formation des tempêtes sont donc nécessaires<sup>10</sup>. »

L'inquiétude de l'assureur rejoint ici celle de la communauté scientifique. Les modèles climatiques, s'ils doivent être interprétés avec prudence, indiquent une tendance à l'accroissement de l'intensité cyclonique en Atlantique Nord du fait du réchauffement, et sans doute un déplacement de leurs trajectoires qui pourrait demain atteindre régulièrement l'Europe.

La question des ouragans, très complexe, reste débattue. Il n'en va pas de même d'autres types d'événements extrêmes qu'il faut anticiper. Le nombre d'épisodes caniculaires va continuer de croître. Leurs impacts sanitaires et en termes de mortalité seront plus élevés que les gains résultant de la baisse des épisodes de grands froids. Et l'écart se creuse fortement sitôt qu'on s'engage sur les scénarios de réchauffement élevés du GIEC<sup>11</sup>.

Les épisodes de précipitations extrêmes vont également se multiplier dans les zones non soumises aux ouragans. Ils provoquent déjà une augmentation du nombre de crues en Europe. De même, des tempêtes comme celles de Lothar et Martin qui ont frappé l'Europe durant l'hiver 1999 risquent de devenir plus fréquentes à mesure que le thermomètre monte.

Les impacts provoqués par le réchauffement global vont bien au-delà des seuls mouvements du mercure dans le thermomètre. L'accroissement du stock de gaz à effet de serre dans l'atmosphère a déclenché des réactions en chaîne qui feront sentir leurs effets pendant longtemps et avec une ampleur qui ne peut qu'augmenter

pendant les prochaines décennies. Voyons maintenant comment peuvent s'y adapter les écosystèmes et, parmi ceux-ci, les sociétés humaines.

## **L'ADAPTATION DES ÉCOSYSTÈMES**

Certains écosystèmes sont particulièrement vulnérables à la hausse du thermomètre. C'est le cas de l'écosystème arctique où le réchauffement est le plus fort. D'où l'image d'Épinal de l'ourse polaire accompagnée de son petit, dérivant sur un bloc de glace, perdue au milieu de la banquise qui fond. Du fait de la rapidité du réchauffement à ces latitudes, la limitation d'un réchauffement à 1,5 °C au lieu de 2 °C aurait un impact très bénéfique sur ce milieu, divisant notamment par plus de 10 la probabilité d'une fonte estivale de la totalité de la banquise.

Les coraux forment un autre écosystème remarquable, notamment la Grande Barrière qui longe la côte du Queensland au nord-est de l'Australie, particulièrement riche en espèces marines. Les coraux blanchissent rapidement et peuvent mourir à la suite d'une hausse relativement modérée de la température de l'eau. Avec un réchauffement inférieur à 1,5 °C, on peut espérer en sauver une partie. À partir de 2 °C, la plupart des coraux sont promis à disparaître, ce qui constituerait une perte très sérieuse de biodiversité marine avec des impacts négatifs sur les ressources halieutiques.

Régulièrement cités, ces exemples sont représentatifs de la fragilisation d'écosystèmes remarquables. Nos sociétés sont sensibles à certaines espèces ou milieux remarquables. Les valeurs accordées aux symboles peuvent parfois être déterminantes pour la prise de conscience des dangers écologiques. Lorsque Rachel

Carson insiste dans son fameux *Silent Spring* sur la menace d'extinction de l'aigle chauve consécutive à l'usage inconsidéré des pesticides, elle ne choisit pas son exemple au hasard : l'aigle chauve parle au public américain, car il est le symbole de la présidence du pays. On le voit représenté dans un écusson chaque fois que le président des États-Unis s'exprime en public !

Dans son ouvrage *La biodiversité, c'est maintenant*, Bernard Chevassus-au-Louis qui préside l'association Humanité et Biodiversité nous donne son éclairage de scientifique sur la question de l'érosion de la biodiversité. Il nous rappelle le rôle majeur de ce qu'il appelle la « biodiversité ordinaire ». Celle que constituent les innombrables êtres microbiens que nous ne voyons pas mais qui s'affairent le long des chaînes alimentaires, jusque dans nos estomacs. Celle qui dans les sols, avec ses vers de terre et ses bactéries, permet aux plantes de se nourrir et de se multiplier... Cette biodiversité ordinaire apporte une multitude de services aux terriens. Elle subit aussi de multiples atteintes, moins médiatisées que l'ourse et sa petite ou le blanchiment des coraux, mais aux conséquences potentielles redoutables pour les sociétés humaines<sup>12</sup>.

Les changements climatiques n'ont constitué jusqu'à présent qu'un facteur secondaire d'extinction des espèces vivantes. À mesure qu'ils vont s'amplifier, ils risquent de renforcer les autres causes anthropiques de perte de biodiversité. Le rythme du réchauffement constitue en effet un choc très rapide à l'échelle du calendrier géologique. Son impact sur la biodiversité dépend de la capacité des êtres vivants à s'y adapter localement ou à migrer vers des habitats plus favorables.

Considérons les espèces animales, le plus souvent dotées d'organes leur permettant de se déplacer. Le réchauffement les

pousse à migrer vers les hautes latitudes, sur les reliefs lorsqu'elles vivent sur terre ou vers les fonds marins pour celles logeant dans la mer. Le cinquième rapport du GIEC prévoit ainsi que la poursuite du réchauffement va modifier la répartition des espèces halieutiques dans les océans du fait de la migration des poissons et autres espèces animales. Ceci tend à appauvrir les écosystèmes des mers tropicales et, au moins dans un premier temps, à enrichir ceux situés plus loin des tropiques qui recevront les migrants<sup>13</sup>.

De telles migrations s'observent aussi sur terre. Elles peuvent avoir dans certains cas des impacts sanitaires sur d'autres êtres vivants. En France, on observe par exemple la remontée de la chenille processionnaire, ennemie des pins, et nombre de forêts canadiennes sont affectées par des maladies nouvelles. Demain, certaines maladies tropicales pourraient remonter vers les zones tempérées. Toutes les espèces sont cependant loin d'avoir la mobilité de ces agents pathogènes : l'ours polaire est là pour nous rappeler les limites de ce type d'adaptation, par encombrement ou déséquilibre des habitats où se réfugient les espèces migrantes.

Les végétaux sont plus sédentaires dans les milieux naturels. Ils peuvent se déplacer, sous l'effet des transports de graines ou de matériels reproducteurs par les vents, les animaux ou les eaux de ruissellement, mais à des rythmes bien trop lents pour s'adapter au rythme du réchauffement contemporain. Le déplacement de leurs aires d'habitat naturel est d'autant plus lent qu'ils vivent longtemps. Les forêts, un ensemble d'écosystèmes influençant fortement le cycle du carbone, regroupent des végétaux à longue espérance de vie et donc potentiellement fortement menacés par la poursuite du réchauffement. Une éventuelle « mauvaise surprise » climatique serait le dépérissement de la forêt amazonienne décrite dans certains scénarios. L'intervention humaine permet naturellement de



court-circuiter le rythme de ces adaptations naturelles : comme les arbres, la vigne est une plante à espérance de vie élevée. Le réchauffement a déjà provoqué des déplacements très rapides de son habitat vers les hautes latitudes, avec la plantation de coteaux au sud-est de l'Angleterre qui commencent à fournir des vins blancs très corrects !

Cette rétroaction du changement climatique sur la biodiversité est un volet majeur. Elle réduit subrepticement nombre de services essentiels à la vie humaine, altère la capacité de stockage du CO<sub>2</sub> atmosphérique par le milieu naturel (les « puits de carbone ») et fragilise l'accès aux ressources alimentaires. C'est pourquoi nombre d'actions pour accroître la résilience des sociétés humaines face au réchauffement global passent par la reconquête de la biodiversité.

## **L'ANTICIPATION, CLÉ DE L'ADAPTATION DES HUMAINS**

À l'exception de l'espèce humaine, les êtres vivants s'adaptent aux changements du climat une fois qu'ils se sont manifestés. Les humains ont une double particularité : ils sont à l'origine du dérèglement climatique ; ils disposent de connaissances qui leur permettent d'anticiper les risques qu'ils ont eux-mêmes provoqués. Cette position face au risque climatique rappelle les analyses du sociologue allemand Ulrich Beck dans *La société du risque*, écrit quelques années après l'accident de Tchernobyl : nos sociétés, à l'individualisme croissant, sont prises de court pour gérer les nouveaux risques que leur organisation industrielle a pourtant générés<sup>14</sup>.

S'ils sont totalement sceptiques, par intérêt, par corruption ou par ignorance, les terriens se comporteront comme les autres espèces vivantes. Ils n'effectueront que des adaptations réactives, après que

les impacts auront frappé. Comme ils n'auront certainement pas fait d'effort pour réduire à temps leurs émissions de CO<sub>2</sub>, les pires scénarios se dessinent à l'horizon. L'adaptation réactive des hommes devient similaire à celle des autres espèces vivantes : migrations forcées depuis les habitats que la perturbation climatique aura rendu invivables, désordres, guerres, famines...

Ce qu'on appelle les stratégies ou les politiques d'adaptation au changement climatique consistent, ni plus ni moins, à chercher à anticiper les impacts pour s'adapter de façon préventive et accroître sa résilience. Ces adaptations préventives peuvent prendre des formes incrémentales, comme par exemple décaler les dates de vendange, mieux protéger sa maison contre les tempêtes de demain ou planter une forêt avec des espèces adaptées aux climats du futur.

Elles nécessitent généralement des actions collectives, menées de façon décentralisée, pour accroître la résilience des territoires : modifications des infrastructures, plans d'occupation de l'espace, révision des maillages urbains, évacuation des zones à vulnérabilité trop élevée... Ce deuxième type d'adaptation a été qualifié par Edwin Zaccai et ses coauteurs d'adaptation « transformationnelle<sup>15</sup> ».

Dans les deux cas, la condition pour déclencher des adaptations préventives est de disposer d'informations fiables, validées sur le plan scientifique, sur les impacts locaux du réchauffement global. Cette mise à disposition de l'information, et son appropriation par les parties prenantes, est une condition première du lancement des démarches d'adaptation.

En France, la région Aquitaine a procédé à une telle démarche sous l'impulsion du climatologue Hervé Le Treut, le successeur de Jean Jouzel à la tête de l'Institut Pierre-Simon-Laplace. La première étape a été la constitution d'un rapport scientifique, transposant les

impacts des scénarios climatiques globaux à la maille régionale<sup>16</sup>. Ces impacts mettent en relief l'échelle de vulnérabilité du territoire, tenant compte de ses spécificités : son positionnement géographique, son couvert forestier très particulier, la fragilité de sa longue côte atlantique sablonneuse, la difficulté de la gestion de l'eau compte tenu du poids des cultures irriguées de maïs... Une fois appropriées par les parties prenantes et actualisées par une comité de veille scientifique, ces informations conduisent à de multiples préconisations qui consistent principalement à intégrer la variable climat dans les politiques existantes de gestion des risques (face aux incendies, aux inondations, aux calamités agricoles...) ou les politiques locales tout court<sup>17</sup>. Pour les acteurs locaux, le risque climatique n'est dès lors plus un concept lointain, mais se décline concrètement en autant d'impacts, positifs ou négatifs, qui vont les affecter directement.

Toutes les régions du monde ne pourront évidemment pas mobiliser un Hervé Le Treut qui, outre son autorité scientifique, a des attaches régionales qui ont motivé son investissement personnel. Pour généraliser les démarches d'adaptation préventive, il faut systématiser les services d'information climatique que devraient fournir les organismes de météo, en plus de leurs bulletins quotidiens que nous consultons pour savoir s'il faut se couvrir ou prendre son parapluie pour aller faire son cours à l'université. Le service de la météo nous informe sur le temps qu'il fera demain ou dans quelques jours. Le service d'information climatique, sur le temps qu'il fera dans 20 ou 50 ans, et au-delà.

## **TROIS HORIZONS TEMPORELS**

À l'horizon de quelques décennies, disons d'ici 2050, les constats des scientifiques sont très convergents. Compte tenu de l'inertie du stock au flux analysée au [chapitre 2](#), la quantité de gaz à effet de serre déjà envoyée dans l'atmosphère conditionne largement les impacts qui affecteront les sociétés : le réchauffement se poursuivra, et avec lui les épisodes caniculaires, les perturbations du cycle de l'eau, la hausse du niveau de la mer et les événements extrêmes. Autant d'impacts auxquels nos sociétés sont déjà confrontées et qui vont s'amplifier. En les anticipant, on peut en réduire les coûts, et aussi en tirer des bénéfices chaque fois que le froid est un facteur limitant de l'activité.

Fonder exclusivement nos stratégies d'adaptation sur les prochaines décennies pourrait s'avérer dangereux. Les impacts du réchauffement continueront à se faire sentir après 2050 et jusqu'à la fin du siècle, à des rythmes qui dépendront à la fois des scénarios d'émission et des multiples rétroactions possibles du système climatique. Certains bénéfices à court terme, comme les gains potentiels de rendements agricoles dans les hautes latitudes, risquent alors de disparaître. Les « mauvaises surprises » climatiques, évoquées au [chapitre 2](#), pourraient déclencher des dommages augmentant non linéairement. Leur probabilité d'apparition s'accroît dans les scénarios d'absence ou de faible réduction des émissions. La prudence consiste donc à analyser la vulnérabilité des différentes sociétés en tenant compte dès à présent des durcissements possibles des impacts entre 2050 et 2100. L'incertitude sur les scénarios d'émission et les rétroactions climatiques doit alors être traitée avec circonspection, mais, en aucun cas, servir de prétexte, nous l'avons vu, pour différer ou limiter l'action.

Au-delà du siècle, le type d'impact à gérer dépendra avant tout des trajectoires d'émission de gaz à effet de serre qui auront été empruntées, mais aussi des multiples changements, technologiques, démographiques, géopolitiques qui auront remodelé les sociétés humaines d'ici là. Autant de changements qu'il est évidemment rigoureusement impossible d'anticiper. Nous pouvons embrasser des visions catastrophistes de ces futurs, comme des visions idylliques. Nous pouvons imaginer que nos institutions politiques auront été capables d'évoluer ou que nos sociétés en auront fait table rase pour créer un monde différent. Nous pouvons nous en remettre à la toute-puissance de la technique : imaginer un Sahara entièrement domestiqué, couvert de panneaux solaires fournissant le monde entier en une électricité devenue quasi gratuite. À l'opposé, nous pouvons anticiper l'effondrement de la civilisation industrielle et une reconstruction sociale à partir des savoirs traditionnels : les systèmes d'irrigation communautaires du Mزاب, plus résilients que les bases de vie pétro-gazières du Sahara !

Ces représentations du monde qui se transmettent de génération en génération circulent désormais à la vitesse de la lumière sur les réseaux numériques. Elles ne nous permettent guère de fonder des stratégies d'adaptation, mais elles jouent un rôle déterminant dans nos perceptions du risque et le déclenchement de nos actions.

## **L'ÉCHELLE DES VULNÉRABILITÉS : LA CARTOGRAPHIE PHYSIQUE**

L'échelle des vulnérabilités se décline également à partir de la dimension spatiale. La cartographie des risques croise la géographie physique avec la géographie économique.

Commençons par suivre les méridiens. Dans certains territoires situés vers les hautes latitudes, le froid est le principal facteur limitant l'activité : Russie pour sa partie sibérienne, Canada dans sa majeure partie, Europe du Nord. Le réchauffement global y procure des opportunités économiques, dans l'agriculture, les transports maritimes, la sylviculture... L'institut Ouranos, basé à Montréal, anime un réseau de chercheurs pour faciliter l'adaptation du Québec aux changements du climat. Ses travaux révèlent la multiplicité des impacts du réchauffement qui sont loin d'agir tous dans le même sens, mais dont beaucoup sont, dans un premier temps, bénéfiques<sup>18</sup>.

La vulnérabilité des territoires aux changements de température s'accroît à mesure qu'on quitte ces latitudes pour les mondes tempérés et tropicaux. Les dommages potentiels s'alourdissent : durcissement des vagues de chaleur, effets négatifs sur les rendements agricoles, risques sanitaires accrus...

La vulnérabilité des territoires dépend beaucoup des perturbations engendrées par le réchauffement global sur le cycle de l'eau : stress hydriques accrus dans certaines zones subtropicales comme le bassin méditerranéen ou la Californie avec plus de menaces d'incendies ; risques d'inondation dans d'autres territoires situés plus au nord où les précipitations s'accroissent. En Asie, une grande incertitude pèse sur l'évolution à venir des régimes des moussons qui subissent des influences contradictoires. À l'échelle plus micro, la vulnérabilité des territoires dépend beaucoup de la proximité des fleuves dont les changements de régime génèrent des risques nouveaux d'inondation, mais peuvent aussi perturber l'activité par pénurie d'eau lors des étiages.

La vulnérabilité d'un territoire aux événements extrêmes est d'autant plus grande qu'il n'y a pas eu de précédent. L'épisode

caniculaire de l'été 2003 en Europe serait apparu totalement routinier à un habitant du Mzab. Il a provoqué le décès prématuré de plusieurs dizaines de milliers de personnes, parce qu'il était inédit sous nos latitudes. Sous cet angle, les risques de déplacement du calendrier et des zones de moussons créent de nouvelles vulnérabilités. Il en va de même des cyclones sur la zone Atlantique Nord dont l'intensité va croissant et qui pourraient, demain, terminer leur trajectoire en Europe, une zone jusqu'à présent épargnée.

Notre cartographie suit enfin avec attention le découpage des côtes. Le tracé séparant les zones émergées de la mer nous semble invariable. Nous savons pourtant que la poursuite du réchauffement global pendant encore quelques décennies conduit inévitablement à le déplacer au profit de la mer. C'est pourquoi les territoires côtiers constituent toujours une zone de grande vulnérabilité, surtout à long terme.

Les deltas, ces étendues plates formées par l'accumulation de limon à l'embouchure des fleuves, constituent, avec les petites îles du Pacifique, des zones de vulnérabilité extrême. La remontée de la mer salinise les sols et accroît les risques de submersion marine ; les changements des régimes des fleuves fragilisent les berges et aggravent les risques d'inondation ; les tempêtes éclatant dans ces zones provoquent inondations qui peuvent se conjuguer à des raz-de-marée. Durant les dernières décennies, les catastrophes climatiques parmi les plus meurtrières ont été observées dans les deltas. Mais l'ampleur des dommages est loin de s'expliquer par les seules considérations physiques. La cartographie des vulnérabilités doit également prendre en compte la dimension socioéconomique.

## **L'ÉCHELLE DES VULNÉRABILITÉS : LA CARTOGRAPHIE ÉCONOMIQUE**

À cause de leur fertilité et de leur double accès aux navigations fluviales et maritimes, nombre de deltas regroupent de grandes concentrations d'humains : environ 90 millions dans le delta formé par le Gange et le Brahmapoutre où a été érigée Dhaka, la capitale du Bangladesh ; plus de 200 millions dans le delta du Mékong et des grands fleuves chinois qui prennent leur source dans l'Himalaya ; 45 millions dans le delta du Nil. On rencontre des concentrations de moindre ampleur dans le delta du Mississippi et celui formé par le Rhin et la Meuse occupés par les bien nommés Pays-Bas. Dans ces milieux particulièrement fragiles, la vulnérabilité pose, comme dans les îles basses du Pacifique, la question de la possibilité d'une adaptation locale ou de la nécessité d'anticiper une migration. Les travaux de géographes montrent, dans le cas du Nil, combien ces zones conservent une grande force d'attraction des populations malgré la multiplicité des signes de leur fragilité<sup>19</sup>.

Les capacités d'adaptation des populations des grands deltas dépendent de l'histoire et du niveau de richesse des populations concernées. Dans son fameux essai *Effondrement*, Jared Diamond évoque la réussite des Pays-Bas face au risque de submersion<sup>20</sup>. Leurs systèmes de défense, constitués de digues et de polders, mais aussi de plans d'occupation à long terme prévoyant le déplacement de certains habitants, accroît la résilience. Rien de tel n'était en place au Bangladesh en 1970 et en 1991 quand les tempêtes et inondations se sont chiffrées en centaines de milliers de victimes<sup>21</sup>. La pauvreté est un facteur majeur d'accroissement de la vulnérabilité climatique.

La liaison entre vulnérabilité climatique et richesse peut se repérer au niveau des pays. C'est un exercice auquel se livrent parfois les agences de notation financière lorsqu'elles tentent d'évaluer les « risques souverains », c'est-à-dire les risques



d'accident de paiement, pire d'insolvabilité, de la part des États. En 2014, Standard & Poor's a ainsi rendu publique une de ses grilles d'évaluation montrant une corrélation négative entre le risque climatique d'un pays et son PIB<sup>22</sup>. La vulnérabilité climatique pèse plus sur les pays pauvres, ce qui tend à dégrader leurs notes relativement aux pays riches. Avec la conséquence directe de rendre plus coûteux leur accès aux financements internationaux.

Autre illustration : les calculs des macroéconomistes. Au terme de son mandat de chef économiste à la Banque mondiale, Nick Stern a réalisé une revue complète de la littérature économique sur la question du changement climatique qui reste une référence incontournable plus de dix ans après sa publication. À partir des modèles permettant d'évaluer les coûts globaux du réchauffement, une opération bien délicate, Stern estime que ceux-ci sont, en proportion de leur PIB, trois fois plus élevés qu'en moyenne dans les pays les plus pauvres<sup>23</sup>.

L'inégale distribution des risques climatiques ne concerne pas que les pays. Chacun peut le constater en examinant par exemple la morphologie des villes. Les quartiers huppés, généralement situés en amont des vents dominants qui charrient les pollutions atmosphériques, sont incomparablement mieux protégés contre les risques d'inondation, de tempête ou de vague de chaleur que les quartiers pauvres. La question de l'injustice climatique apparaît aussi lorsqu'on établit une cartographie des vulnérabilités à l'échelle locale, celle qui compte pour mettre en œuvre des stratégies d'adaptation au changement climatique.

## **LE RÔLE DES STRATÉGIES D'ADAPTATION**

Pendant longtemps, les économistes du climat ne se sont guère occupés de l'adaptation au changement climatique. Ils ont même parfois avancé l'argument que mobiliser trop de ressources pour s'adapter au changement climatique pourrait s'effectuer au détriment de l'enjeu prioritaire qui est de l'atténuer par une réduction drastique des émissions. Un tel raisonnement repose sur l'idée qu'on a une enveloppe globale à répartir entre deux stratégies concurrentes, une question très classique dans les manuels d'économie. Cette façon de poser le problème ne résiste pas longtemps à l'examen du fonctionnement réel de nos sociétés où stratégies d'adaptation et actions d'atténuation sont bien plus complémentaires que concurrentes. La gestion du risque climatique repose sur les deux jambes que sont l'adaptation et l'atténuation.

Depuis la Stern Review qui a contribué à clarifier la question<sup>24</sup>, les économistes les plus orthodoxes ont compris que l'adaptation au changement climatique réduisait le coût futur des dommages climatiques. Il est donc économiquement justifié d'y investir tant que le coût de l'investissement additionnel en adaptation est inférieur au gain obtenu sur le dommage futur.

L'économiste Mendelsohn a été parmi les premiers à conduire des travaux empiriques en la matière, portant sur l'agriculture nord-américaine. Dans une première étape, il a tenté de calculer l'impact du réchauffement sur les agriculteurs à partir d'un modèle projetant les systèmes de culture inchangés avec un climat plus chaud demain. Les résultats ne se sont pas fait attendre : une forte baisse des rendements consécutive à l'inadéquation des mises en valeur agricoles d'aujourd'hui au temps qu'il fera demain. Toutes choses égales par ailleurs, une telle baisse des rendements provoque une hausse des coûts induite par le réchauffement. En refaisant la projection, avec des hypothèses d'adaptation de leurs systèmes de

culture par les agriculteurs, les résultats sont bien différents : l'effet net sur les rendements est positif jusqu'à un réchauffement moyen de l'ordre de 2 °C à 3 °C, pour s'inverser ensuite à mesure que le mercure monte dans le thermomètre<sup>25</sup>. L'adaptation a donc permis de réduire les coûts des changements climatiques de façon très marquée tant que le réchauffement reste limité, beaucoup moins après.

Cette justification des politiques d'adaptation par la réduction des coûts futurs de l'action repose néanmoins sur l'hypothèse que les actions d'adaptation réussissent, sinon à tous les coups, du moins dans la majorité des cas. L'observation de la gestion des risques dans les sociétés humaines conduit à s'interroger sur la robustesse de cette hypothèse.

L'un des exemples les plus célèbres nous vient d'André Maginot, sous-secrétaire d'État à la Guerre lorsqu'éclata le premier conflit mondial et plusieurs fois ministre des Armées dans les années 1920. Maginot fut à l'origine de la fameuse ligne de fortifications qui porta son nom, construite à grands renforts de milliards à partir de 1928, qui s'étendait en 1939 des Alpes aux Ardennes. Une ligne qu'il considérait comme infranchissable par l'armée allemande et donc protectrice du territoire hexagonal. La campagne de France fut pourtant l'une des plus rapides de la Seconde Guerre mondiale. Les blindés allemands évitèrent la ligne Maginot où étaient concentrées les défenses françaises, et prirent le chemin le plus court pour atteindre Paris : le massif des Ardennes, supposé infranchissable par l'état-major français. Une erreur d'appréciation sur la vulnérabilité du territoire à protéger qui coûta cher en termes militaires.

Compte tenu de la difficulté d'évaluer l'échelle des vulnérabilités, on ne peut exclure que certains investissements décidés aujourd'hui

au titre de l'adaptation au changement climatique ratent leur cible et ne contribuent pas à la résilience des territoires. On parle dans ce cas du risque de « mal-adaptation ». Ce risque complique singulièrement le calcul économique classique.

Il y a d'autres justifications que l'application de la grille d'analyse coûts-bénéfices à la mise en œuvre de stratégies d'adaptation. La première concerne le lien que nous avons observé entre inégalité et vulnérabilité climatique. La gestion du risque climatique ne peut s'effectuer sans un diagnostic clair de son inégale distribution. À l'échelle locale, si un territoire s'en remet aux seules adaptations spontanées des acteurs, il y a fort à parier que les inégalités face au risque climatique vont se creuser, et la vulnérabilité globale du territoire, s'accroître. Les riches disposent de plus de ressources et de meilleurs accès aux informations que les pauvres. Si on veut accroître la résilience d'un territoire, l'efficacité consiste à conduire une stratégie d'adaptation couplée à une politique de réduction des inégalités face au réchauffement global.

L'implication est rigoureusement la même lorsqu'on change d'échelle géographique. Pour coordonner l'action internationale face au risque climatique, il faut tenir compte de l'inégale vulnérabilité des pays suivant leur niveau de richesse. Comme on le verra au début de la troisième partie, intégrer correctement les questions d'adaptation au changement climatique constitue un préalable pour intégrer les pays moins avancés, les plus vulnérables au risque climatique, dans un accord international.

L'autre raison de miser sur la complémentarité entre adaptation et atténuation est basique. Lorsque des démarches d'adaptation du type de celle rencontrée en Nouvelle-Aquitaine sont conduites sur le terrain, la perception du risque climatique change de nature. Elle n'est plus abstraite, comme « extérieure » aux parties prenantes,

mais prend la forme d'une somme d'impacts qui les affectent directement. Ce changement de représentation renforce leur consentement à s'engager dans les actions de réduction des émissions de gaz à effet. C'est pourquoi, suivant la belle expression de Zaccai et Weikmans, « entre atténuation et adaptation, il ne faut pas choisir » !<sup>26</sup>

## CHAPITRE 4

### MESSAGE BIEN REÇU ?

Grâce au GIEC et à la mobilisation des scientifiques qu'il a favorisée, le changement climatique est devenu l'une des questions les mieux documentées. D'un rapport à l'autre, les diagnostics du GIEC sur le réchauffement global se sont affinés. Ils ont été confirmés par les observations des stations météo du monde entier. La Conférence annuelle des Nations unies sur le climat est devenue un rendez-vous pour les médias internationaux qui accordent désormais une large place à la question climatique.

Les messages du GIEC sont relayés par les grandes institutions multilatérales comme le FMI, la Banque mondiale ou l'OCDE. Ils ont été repris par l'encyclique *Laudato Si'* qui actualise la doctrine écologique de l'église catholique. Quand le World Economic Forum sonde en 2018 les dirigeants économiques sur les risques majeurs pour le business, la réponse ne se fait pas attendre : les événements climatiques extrêmes pointent en tête, loin devant l'inflation ou la déflation<sup>1</sup>.

Parfaitement clair et désormais bien relayé, comment est reçu le message des scientifiques du climat ? La question climatique a pénétré l'espace politique et fait l'objet d'une mobilisation croissante de la jeunesse. C'est le volet encourageant. Cependant, la

multiplication des relais de communication fait parfois penser à une superposition de voiles masquant une réalité embarrassante : les messages des scientifiques du climat glissent sur les sociétés. Ils restent à la périphérie, sans suffisamment influencer les décisions qui continuent d'être prises en fonction de contraintes de court terme.

Nous démarrons ce chapitre par un retour sur un épisode qui a agité les réseaux sociaux en France, fin 2018 : l'emballement de deux pétitions en ligne, l'une faisant reculer le gouvernement sur la taxation carbone, l'autre appelant à le poursuivre devant les tribunaux pour non-respect de ses engagements climatiques. Nous y voyons l'ambivalence stupéfiante des sociétés contemporaines à l'égard des messages en provenance des sciences du climat.

Le déni est une réaction habituelle face à l'émergence de nouvelles alertes environnementales. Relayé par des lobbies défendant de puissants intérêts économiques, il peut exercer son influence plus ou moins longtemps : 100 ans dans le cas de l'amiante, mais seulement 10 ans dans celui de la couche d'ozone. Dans le cas du climat, les postures de déni n'ont pas disparu, 30 ans après la publication du premier rapport du GIEC (1990). Elles ont été renforcées par la vague populiste et l'arrivée au pouvoir de climatosceptiques affichés aux États-Unis, en Australie ou au Brésil. L'ambivalence des sociétés apparaît également dans le climatoscepticisme rampant. Une attitude consistant à relativiser les impacts du réchauffement en se donnant l'illusion que nous avons du temps.

Nous nous interrogeons en fin de chapitre sur la façon de contrer ces différentes formes de scepticisme. Le catastrophisme ne semble pas constituer le bon antidote. La bonne voie consiste à multiplier les allers-retours entre échelles globales et locales, pour mieux identifier

les impacts concrets du réchauffement et aussi détecter les solutions existantes susceptibles de convaincre les opinions publiques de l'existence d'alternatives à la catastrophe annoncée.

## **FINS DE MOIS CONTRE FIN DU MONDE**

Décembre 2018. Deux pétitions en ligne battent en France tous les records sur les réseaux sociaux. La première réclame, et obtient, l'arrêt de la taxation des carburants adoptée au nom de la lutte contre le changement climatique. La seconde soutient un recours en justice contre l'État français pour non-respect de ses engagements sur le climat. À première vue, ces deux pétitions semblent refléter une opposition binaire au sein du corps social : les uns n'auraient pas intégré les messages des sciences du climat et continueraient de privilégier les revendications de court terme. Les autres auraient pris conscience des dangers du réchauffement global et se mobiliseraient pour l'action immédiate. Les bons et les mauvais. Examinons la chose de plus près.

Mai 2018. Une pétition réclamant la baisse des prix des carburants apparaît sur les réseaux sociaux. Elle émane de Priscillia Ludosky, simple citoyenne de la région parisienne qui ne dispose d'aucun relai institutionnel. Adressée au ministre de l'Écologie et au président de la République, elle remet en cause la montée en régime de la fiscalité décidée quelques mois plus tôt au nom de la politique climatique. Restée confidentielle jusqu'en octobre, la pétition connaît un succès fulgurant à partir de novembre. Fin décembre, elle est signée par plus d'un million de personnes. Elle a été l'un des éléments déclencheurs du mouvement des gilets jaunes qui a contraint le gouvernement à renoncer à l'augmentation de la taxation écologique, un instrument pivot de sa stratégie bas carbone.



Le texte ne discute à aucun moment de la réalité du réchauffement ou de la légitimité, voire de l'urgence, des politiques climatiques. Il martèle des messages simples : les citoyens assurent de plus en plus difficilement leurs fins de mois. Ils sont les victimes du renchérissement des carburants. Ce n'est pas à eux de subir des hausses supplémentaires, même s'il s'agit de lutter contre la « fin du monde » pour reprendre une expression de l'un des manifestants.

Mi-décembre 2018. La pétition « L'affaire du siècle » est lancée alors que le mouvement des gilets jaunes prend son envol. Elle vise également le gouvernement en l'attaquant non sur les fins de mois, mais sur la fin du monde. Le gouvernement est accusé de ne pas remplir ses engagements. Il sera donc poursuivi devant les tribunaux pour qu'il en fasse plus afin de protéger les citoyens face à la menace climatique. La pétition sur le climat évoque aussi les fins de mois en déplorant que les classes moyennes et démunies contribuent de « façon indifférenciée » au financement de l'action face au changement climatique. Une allusion explicite à la revendication des gilets jaunes. Elle réclame plus de justice tout en restant muette sur les moyens d'y parvenir et sans jamais faire allusion aux taxes écologiques qui ont mis le feu aux poudres.

Contrairement à celle sur le prix des carburants, la pétition sur le climat bénéficie du savoir-faire de grandes organisations environnementales et du soutien de vedettes du monde du spectacle. Cela contribue à son succès fulgurant : début janvier, elle est signée par près de deux millions de personnes. Ses signataires se mobilisent non pour agir personnellement, mais pour contraindre l'État à le faire en investissant plus pour protéger les populations et les territoires contre les impacts destructeurs du changement climatique.

Les deux pétitions se rejoignent sur un point : les revendications sont ciblées sur l'État accusé de rendre la vie impossible aux citoyens soit par des taxes usuraires, soit par l'indigence des moyens alloués à la lutte contre le dérèglement climatique. Dans les deux cas, l'objectif est de faire bouger l'État par la pression de la rue ou celle des tribunaux. Beaucoup moins de se bouger soi-même ou de se remettre en question !

Plutôt qu'un clivage entre ceux qui ont pris conscience de la menace et les autres, la simultanéité des deux pétitions reflète plutôt l'ambivalence, voire la schizophrénie, de nos sociétés face au climat. Il est devenu impossible de ne pas entendre le message des scientifiques sur le climat. Mais on trouve toujours d'excellentes raisons (le trop-plein fiscal, la carence de l'État) pour repousser à plus tard les actions que nous pourrions immédiatement engager pour réduire les émissions.

De tels mouvements d'opinion sont-ils susceptibles de déplacer les curseurs ? Le mouvement des gilets jaunes est parvenu à faire reculer le pouvoir sur la taxe carbone. Et la pétition des pro-climat ? Dans l'attente d'éventuelles suites judiciaires, les pouvoirs publics y ont répondu par la mise en place d'une nouvelle structure de gouvernance, le Haut Conseil pour le Climat, inspirée du « Committee on Climate Change » fonctionnant au Royaume-Uni depuis 2008. Une structure supplémentaire d'expertise sur le climat, dont nous examinerons les premiers pas au [chapitre 12](#).

## **LE DÉNI ENVERS ET CONTRE TOUT ?**

Sitôt qu'apparaît une nouvelle alerte environnementale, le déni est l'une des premières réactions du corps social. Il est généralement propagé par des acteurs que cette alerte dérange, le

plus souvent parce qu'elle contrarie leurs intérêts économiques, comme l'observent François Jarrige et Thomas Le Roux dans leur fresque historique *La contamination du monde*<sup>2</sup>. C'est une réaction de défense face à une information qui dérange. Elle peut durer plus ou moins longtemps suivant les circonstances.

Nous l'avons rencontrée dans le cas de la destruction de la couche d'ozone. Les premières observations du trou dans la couche d'ozone sont effectuées au milieu de la décennie 1970. Elles ne sont pas contestées très longtemps, car les preuves fournies par les observatoires scientifiques s'accumulent. Le déni va alors se reporter sur la cause anthropique du phénomène : le rejet des gaz CFC assez rapidement suspectés par les spécialistes de l'atmosphère. Durant une décennie, le doute subsistera dans l'opinion publique sur le rôle de ces gaz, en grande partie sous l'effet du lobbying de ses producteurs qui assènent en public des contrevérités, mais travaillent en parallèle à la mise au point de substituts aux CFC.

La situation se modifie radicalement au milieu des années 1980. Le public a pris conscience de la menace environnementale qui est focalisée sur un risque sanitaire précisément documenté : le cancer de la peau. Sous l'angle industriel, la puissante société Dupont de Nemours est prête à lancer des produits de substitution aux CFC. En quelques années, elle change son fusil d'épaule et soutient leur interdiction progressive qui sera entérinée en 1987 dans le cadre du protocole de Montréal. Une décennie pour vaincre le réflexe du déni dans le cas des CFC et de la couche d'ozone, cela peut paraître long. C'est plutôt court en comparaison du cas de l'amiante.

La toxicité de l'amiante fut décrite pour la première fois avec moult précisions par Lucy Deane, médecin de son état, dans un rapport de l'inspection du travail britannique de 1889<sup>3</sup>. Ses

observations provenaient des chantiers navals où les ouvriers inhalaient des poussières d'amiante volant dans l'atmosphère. Dans les années 1920, les assureurs américains firent savoir qu'ils ne couvriraient plus ce type de risque. Et pourtant, la toxicité de l'amiante faisait encore débat en France au début des années 1980, dans le cadre d'un « Comité Amiante » où étaient largement représentés les industriels du secteur. L'interdiction de l'amiante n'a été décidée pour sa part qu'en 1989, un siècle après le rapport de Lucy Deane !

Dans le cas du climat, Clive Hamilton décrit dans son ouvrage *Les apprentis sorciers du climat* les multiples ramifications qui ont rattaché l'émergence du climatoscepticisme aux intérêts économiques liés à l'exploitation des fossiles<sup>4</sup>. Comme dans le cas de la couche d'ozone ou de l'amiante, le déni du changement climatique a commencé par la négation de l'existence du phénomène en lui-même. Avec la multiplication des relevés, notamment les progrès des mesures satellitaires, il devenait difficile de contester le réglage des thermomètres. La hausse de la température moyenne a été avérée avec le temps qui passe. Le déni n'a pas disparu pour autant. Il s'est déplacé en se focalisant sur le caractère anthropique ou non du changement climatique.

On n'est guère crédible quand, d'un côté, on nie le caractère anthropique du réchauffement et quand, de l'autre, on dégage des montagnes de cash-flow en exploitant du pétrole ou du charbon. Aussi, le climatoscepticisme, initialement porté par des officines subventionnées par des lobbies du fossile, a élargi ses canaux de propagation. Dans *Merchants of Doubt (Les Marchands de doute)* qui prend parfois des allures d'enquête policière, les historiens Naomi Oreskes et Erik M. Conway ont montré comment ces canaux pouvaient utiliser les voix de quelques scientifiques égarés. Le

climatoscepticisme peut alors se parer d'une apparence scientifique pour tromper son monde, car il n'y a pas de réel débat, au sein de la communauté scientifique, sur le caractère anthropique ou non du réchauffement climatique. En France, Claude Allègre a personnifié ce type de climatosceptique professionnel, utilisant sa position dans les sciences de la Terre pour apporter le doute sur la rigueur, et même l'honnêteté, des travaux du GIEC.

Cette vague de climatoscepticisme « pseudo-scientifique » a culminé en 2009, avant la conférence de Copenhague. Depuis, elle a nettement reflué, mais a été relayée par la vague populiste. Celle où les « faits alternatifs » supplantent les messages de la science sur les réseaux sociaux.

## **POPULISME ET CLIMATOSCEPTICISME**

Dans les pays de langue anglaise (ou majoritairement anglaise dans le cas du Canada) riches en ressources fossiles, le climat est devenu un facteur majeur de clivage entre les conservateurs et les progressistes, la droite et la gauche dirait-on en France. Une nouvelle catégorie de climatosceptiques professionnels émerge : les hommes politiques. Du coup, les politiques climatiques sont affectées par des successions d'avancées et de reculs au gré des alternances électorales.

Nouveau Premier ministre, Justin Trudeau réaffirme l'ambition climatique du Canada à la conférence de Paris en 2015. Il tourne le dos aux choix de son prédécesseur Stephen Harper, climatosceptique déclaré, qui n'avait pas hésité à quitter le protocole de Kyoto pour mieux exploiter les pétroles de schiste. Une fois aux manettes, Trudeau n'en aura pas fini avec les climatosceptiques qui

restent très influents dans certaines provinces comme l'Ontario ou l'Alberta.

Donald Trump est élu en novembre 2016. Climatosceptique bruyant, il s'empresse de démolir le *Clean Power Plan* légué par son prédécesseur Barak Obama et de nommer à la tête de l'agence environnementale une personnalité connue pour sa proximité avec l'industrie du charbon. En 2001, son prédécesseur républicain avait pris la précaution de commander une évaluation scientifique à l'Académie des sciences américaine au moment de quitter le protocole de Kyoto. Trump ne s'embarrasse pas de telles précautions quand il décide de sortir de l'accord de Paris en 2017. Pour lui, le changement climatique est tout simplement une invention de complotistes, de préférence aux yeux bridés, qui menacent la grandeur de l'Amérique. Il n'y a pas matière à discussion, pas plus que sur l'affluence de la foule lors de son investiture. Un « fait alternatif » auquel adhère une partie de l'opinion, car elle est branchée aux réseaux sociaux qui le font exister.

En Australie, la question du climat a contribué à la valse des Premiers ministres, jusque dans les rangs du parti conservateur. En 2018, Malcolm Turnbull, un conservateur qui refusait de rayer de l'agenda politique les engagements de l'accord de Paris, a été contraint de céder sa place à Scott Morrison, climatosceptique déclaré. Auparavant, les alternances d'un parti travailliste volontariste et d'un parti conservateur de plus en plus influencé par le scepticisme climatique ont généré une suite de *stop and go* particulièrement nuisibles à la politique climatique.

En dehors de l'« anglosphère », un nouveau climatosceptique professionnel a rejoint la classe politique début 2019, Jair Bolsonaro, à la tête du Brésil. La continuité de la politique climatique du pays

gérant le premier massif forestier mondial risque d'en prendre un sérieux coup.

En Europe, le climatoscepticisme n'a pas créé de clivage majeur au sein de la classe politique traditionnelle. La montée des partis populistes pourrait changer la donne et dissoudre les consensus existants. En Suède, l'hostilité du parti d'extrême droite à la taxe carbone remet frontalement en cause un compromis de près de trente ans entre partis politiques et syndicats. Le signal envoyé par le mouvement des gilets jaunes en France va dans le même sens. Au Royaume-Uni, le Brexit risque de faire passer au second plan la préoccupation climatique. En Europe de l'Est, les gouvernements nationalistes en Pologne ou en Hongrie sont aussi ceux qui s'opposent le plus vigoureusement à la mise en œuvre de la stratégie européenne de décarbonation. Le climat pourrait, comme dans l'« anglosphère », devenir un sujet cristallisant les oppositions et les tensions. Le terrain y est peut-être plus favorable qu'on ne l'imagine en raison de l'existence d'une forme insidieuse de scepticisme climatique qu'on pourrait qualifier de « rampant ».

## **SCEPTICISME RAMPANT CONTRE CATASTROPHISME AFFICHÉ**

Le scepticisme rampant ne remet pas en cause le caractère anthropique du changement climatique. Il en relativise les conséquences. Le risque climatique est en quelque sorte banalisé. Les aiguilles de l'horloge climatique peuvent dès lors continuer de s'agiter : chacun trouvera un bon prétexte pour retarder les actions à entreprendre. Le côté le plus malfaisant du climatoscepticisme rampant est sans doute qu'il nous donne l'illusion que nous avons du temps.

L'ouvrage de Bjørn Lomborg *L'écologiste sceptique* a contribué à diffuser ce type de réaction. L'auteur, un ancien militant de Greenpeace devenu contestataire des messages du GIEC, a su habilement jouer de son parcours individuel pour semer le doute. Il ne conteste pas le caractère anthropique du changement climatique. Il compare, avec une méthode assez triviale de calcul économique, les impacts du réchauffement climatique à d'autres méfaits comme la faim, les maladies, le sous-développement... Allant à contre-courant, il considère que les conférences sur le climat pourraient être contreproductives : les risques du réchauffement y sont d'après lui systématiquement surestimés. Les stratégies climat pourraient accaparer des ressources bien mieux utilisées ailleurs<sup>5</sup>.



Figure 4.1 Comment communiquer sur l'urgence climatique ?



*Les messages alarmistes sur l'état de la planète ne sont pas toujours reçus comme on pourrait s'y attendre, comme le suggère le dessinateur Pierrick.*

Source : <http://pierrickdegomme.canalblog.com/>, 21-12-2018

Face au scepticisme rampant, une réaction courante des mouvements écologiques est de hausser le ton en martelant le risque de la catastrophe imminente. Cette dramatisation des enjeux est devenue coutumière à chaque sommet climatique. C'est elle qui met les jeunes dans la rue. Elle est de plus en plus relayée par la crainte de possibles effondrements des sociétés du fait de la puissance de destruction des terriens à l'ère de l'Anthropocène. L'ouvrage de Pablo Servigne et Raphaël Stevens *Comment tout peut s'effondrer*<sup>6</sup> a contribué à diffuser cette crainte dans une partie de l'opinion.

Le catastrophisme trouve ses racines dans la philosophie allemande de l'après-guerre, notamment chez Hans Jonas et son fameux « principe de responsabilité ». Son application au climat a été théorisée par Jean-Pierre Dupuy dans *Le catastrophisme éclairé*. Dupuy affirme que l'antidote au doute et à l'inaction consiste à se persuader que la catastrophe est inéluctable. Il s'agit de raccourcir le temps, en convertissant une menace lointaine en un événement qui va se produire de façon imminente. Suivant les termes de l'auteur, il faut se convaincre « d'une autodestruction qui serait inscrite dans son avenir figé en destin, avec l'espoir que cet avenir, bien qu'inéluctable, n'ait pas lieu<sup>7</sup> ».

À l'appui de sa thèse, Dupuy cite les réflexions de Bergson sur le déclenchement de la Première Guerre mondiale, catastrophe que personne n'imagina possible avant son déclenchement. À l'inverse, la réussite de la doctrine de dissuasion nucléaire repose sur une situation où on rend la catastrophe absolument certaine si on appuie en premier sur le bouton nucléaire.

La transposition du raisonnement au cas du changement climatique semble osée. Le catastrophisme éclairé est probablement un passage obligé pour ceux qui sont déjà convaincus du message

des sciences du climat. Mais les autres ? L'effet sera plutôt la paralysie. Ou au contraire, puisque tout est fichu, une incitation à profiter au maximum du temps qu'il reste. Le dessin de Pierrick nous le rappelle avec beaucoup de talent. Comme le souligne Francis Chateauraynaud, on peut « signer des tribunes inquiétantes, les solutions ne viennent pas pour autant. L'enjeu n'est pas d'annoncer l'inéluctabilité de la catastrophe, mais de se saisir des problèmes aux différentes échelles d'action<sup>8</sup> ».

Face au scepticisme rampant, le bon antidote est probablement de multiplier les allers-retours entre ces différentes échelles de l'action. En tenant compte d'une remarque éclairante de Servigne et Stevens : « Des expériences en psychologie sociale ont montré que, pour que les gens prennent au sérieux la menace, il était nécessaire qu'ils soient bien informés de la situation et qu'ils disposent d'alternatives crédibles, fiables et accessibles<sup>9</sup>. » Le terme de « collapsologie » que ces deux auteurs ont forgé est souvent mal interprété. L'effondrement qu'ils anticipent n'est pas celui du monde, mais d'une civilisation. Mieux en comprendre les ressorts doit permettre de trouver des alternatives. Servigne et Stevens, qui ne croient pas à la possibilité de réformer le système, vont les chercher dans des expériences de rupture, préfigurant à l'échelle locale les sociétés d'après l'effondrement.

Pour ce qui est de la bonne information, les travaux du GIEC sur les impacts du changement climatique offrent une matière première sans équivalent. Pendant longtemps, les panoramas qu'ils brossaient restaient abstraits, extérieurs à la réalité vécue par la majorité des gens. L'emballlement du thermomètre et l'aggravation des événements extrêmes sont en train de changer la donne. Le corps social fait de plus en plus le lien entre l'alerte des scientifiques sur le climat et les informations qu'il peut recueillir sur le climat qu'il

fait « en vrai ». Le réchauffement cesse alors d'être une affaire d'experts, pour devenir une question posée à l'ensemble de la société, parfois avec une grande urgence quand on vit dans des conditions particulièrement exposées.

Pour ce qui est des « alternatives crédibles, fiables et accessibles », ici encore, les scénarios planétaires sont utiles, mais éloignés de ce que chacun peut faire. Quand ils sont construits avec prosélytisme, leur irréalisme saute aux yeux et ramène à nouveau vers le scepticisme ou le catastrophisme. L'aller-retour avec les solutions locales, les ruptures porteuses de progrès, les signaux faibles est la bonne méthode pour intégrer les messages de la science du climat, non seulement dans notre représentation, mais aussi dans nos décisions et, pour certains d'entre nous, nos choix de vie.

Tant pour évaluer les impacts du réchauffement que pour construire des réponses accessibles, les économistes devraient avoir une certaine utilité sociale. À condition que la société sache en faire bon usage.

## **DU BON USAGE DES ÉCONOMISTES**

William Nordhaus, professeur à l'université de Yale, fut le premier à investiguer les liens entre le changement climatique et le fonctionnement de l'économie dans un article fameux paru en 1977<sup>10</sup>. Il tenta par la suite d'affiner son approche à partir de modèles qui calculent les coûts actualisés des dommages climatiques présents et futurs, associés à différentes trajectoires d'émission de gaz à effet de serre. Cela lui a valu le Nobel d'économie en 2018, le premier attribué à un économiste du climat

et... quelques critiques de collègues jugeant sa méthode trop réductrice, voire dangereuse.

De fait, le calcul économique standard utilisé par Nordhaus est mal adapté à la question du changement climatique. Ses résultats sont très incertains et rarement concordants. Nordhaus est le premier à le reconnaître dans son ouvrage *The Climate Casino* : « Une approche équilibrée suggère que l'objectif de 2 °C est à la fois trop bas et trop haut<sup>11</sup>. » Tout dépend de la nature des risques qu'on intègre dans les modèles et de la valeur qu'on donne au temps.

Dans sa fameuse revue de 2008, Stern débouche sur des conclusions nettement plus alarmistes que celles de Nordhaus. Il a pourtant utilisé des méthodes comparables, mais a opéré une sorte de raccourcissement du temps en utilisant un taux d'actualisation réel proche de zéro. Autrement dit, en donnant la même valeur à un dommage qui interviendrait dans 100 ans et à un autre que nous subirions demain. D'une certaine façon, il a appliqué dans ses méthodes de calcul la recommandation de Dupuy d'agir comme si la catastrophe était imminente.

Pour tenter de dépasser cette méthode dite « coûts/bénéfices », des équipes de modélisation tentent de renouveler la discipline en s'interrogeant sur les risques de rupture du système économique en réaction au réchauffement global. En France, Gaël Giraud développe de tels outils, déclinés par pays ou zone géographique<sup>12</sup>. Les impacts du changement climatique n'y apparaissent plus comme des coûts, mais comme des facteurs de rupture susceptibles de conduire à l'effondrement des économies. Le facteur déclenchant peut être la finance ou le commerce international, mais aussi l'accroissement insoutenable des inégalités ou les flux migratoires. Cela donne une meilleure représentation des risques du changement climatique. Reste à en convaincre les décideurs et les

citoyens qui ont bien du mal à comprendre l'incapacité des économistes à se mettre d'accord sur des diagnostics consensuels.

Ce deuxième courant se rattache à celui, plus ancien, introduit par l'économiste Georgescu-Roegen (1906-1994) qui a tenté de rapprocher les dynamiques de la croissance économique des processus de la thermodynamique, et notamment du phénomène de l'entropie. L'économiste américain Herman Daly, à l'origine avec son collègue John Cobb de l'« indicateur du progrès véritable », s'inscrit dans cette lignée. Il remet plus explicitement en question l'intérêt de la poursuite de la croissance à partir d'un certain niveau de richesse atteint. Une telle remise en cause ne peut laisser indifférents les économistes du climat, car elle rejoint l'une des questions les plus épineuses débattues dans les conférences sur le climat.

Ces modélisations diffèrent également par leurs implications sur le type de politique à conduire pour limiter les risques du réchauffement. Les économistes conventionnels comme Nordhaus ou Stern privilégient généralement la voie des incitations, en particulier via la tarification du carbone (taxes carbone ou marchés de permis). Les modélisations en termes de déséquilibre de systèmes privilégient des méthodes plus radicales, notamment en termes de réduction des inégalités et de transformations du système financier. Les travaux de Georgescu-Roegen et Daly posent plus directement la question des liens entre croissance économique et changement climatique.

Aucun de ces courants de pensée n'apporte une réponse définitive qui s'imposerait à toutes les autres. Le bon usage des économistes consiste donc à éviter de s'enfermer dans leurs querelles picrocholines et à piocher dans les méthodes d'analyse les outils les plus pertinents en fonction des questions posées. Avec un

œil rivé sur l'adéquation entre les concepts utilisés et les faits observés.

Nous tenterons de nous conformer, dans la suite de l'ouvrage, à une telle approche pragmatique. Dans la deuxième partie, nous allons examiner plus en détail les transformations à opérer pour réagir efficacement face au tic-tac de l'horloge climatique. Ces transformations ne sont pas marginales. Elles vont remettre en cause de multiples volets du fonctionnement des sociétés actuelles. C'est sans doute l'une des explications à la prégnance des réactions de déni ou de scepticisme dans le corps social : elles permettent de toujours trouver une bonne raison pour remettre à plus tard des actions que nous devrions entreprendre immédiatement face à l'urgence climatique.

## PARTIE II

# NEUTRALITÉ CARBONE

Article 4 de l'accord de Paris : « En vue d'atteindre l'objectif de température à long terme énoncé à l'article 2, les Parties cherchent à parvenir au plafonnement mondial des émissions de gaz à effet de serre dans les meilleurs délais, étant entendu que le plafonnement prendra davantage de temps pour les pays en développement, et à opérer des réductions rapidement par la suite conformément aux meilleures données scientifiques disponibles de façon à parvenir à un équilibre entre les émissions anthropiques par les sources et les absorptions anthropiques par les puits de gaz à effet de serre au cours de la deuxième moitié du siècle<sup>1</sup>. » La formule est un peu lourde, voire hermétique. Elle introduit l'objectif de neutralité carbone, l'une des dispositions phares de l'accord.

Durant leurs premières étapes, les politiques climatiques ont reposé sur des objectifs fixés en termes d'émissions brutes de gaz à effet de serre. À la fin des années 2000, l'objectif de limiter le réchauffement en dessous de 2 °C s'est imposé dans la communauté internationale. Il s'agit d'une cible ultime, largement justifiée par les travaux du GIEC montrant les risques d'emballement au-delà de cette limite. Mais le responsable politique le plus puissant



n'a aucun levier d'action direct sur les températures moyennes qu'il fait. En l'état, l'objectif reste déclaratif.

L'objectif de neutralité carbone fournit une clé de passage entre la cible de température visée à long terme et la variable de commande du réchauffement : le stock de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Les activités humaines rejettent des gaz à effet de serre, mais peuvent aussi accroître (par exemple planter une forêt) ou diminuer (par exemple déforester) la capacité d'absorption du CO<sub>2</sub> des puits de carbone naturels : l'océan et la biosphère. Les émissions brutes remplissent le réservoir atmosphérique. Les absorptions le vident. Au point d'égalisation, on stabilise le stock. On atteint le régime de neutralité carbone. Si les émissions passent en dessous des absorptions, on bascule en régime d'émissions nettes négatives, ce qui fait baisser le stock.

Face au tic-tac de l'horloge climatique, l'impression prévaut que cet horizon de la neutralité carbone reste lointain. Pire, que la ligne d'horizon s'éloigne à mesure qu'on avance, comme lorsqu'on navigue en mer. La raison première nous en a été donnée dès le premier chapitre. Tant que le système énergétique ne s'est pas écarté de la logique de l'empilement des sources, on ne peut contenir le trop-plein de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Pour viser la neutralité carbone, nos sociétés doivent en premier lieu rompre avec cette mécanique de l'empilement, grâce à la transition énergétique. Cette transition en est à ses prémices, mais est en train de s'accélérer.

Pour autant, la transition énergétique ne garantit pas l'atteinte de la neutralité carbone. Supposons que les fossiles aient été éradiqués du système énergétique et que les émissions résultant des procédés industriels aient été supprimées. Serions-nous nécessairement en situation de neutralité ? Cela dépendrait des émissions résiduelles

des gaz à effet de serre non CO<sub>2</sub> et de l'état des puits de carbone. Si, pour sortir les fossiles du système énergétique, on a rasé les forêts pour produire de l'énergie, accru l'exploitation minière des sols au nom des rendements agricoles, développé des productions animales fortement émettrices de méthane pour nourrir la population, on risque fort de rater la neutralité carbone. On aura réduit la capacité d'absorption de CO<sub>2</sub> du milieu naturel et accru les rejets de gaz à effet de serre non CO<sub>2</sub>. Pour viser la neutralité carbone, il ne suffit pas de débarrasser le système énergétique de sa dépendance aux fossiles. Il faut aussi maintenir la capacité d'absorption des puits de carbone et surveiller les gaz à effet de serre non CO<sub>2</sub> dont l'agriculture est la première source d'émission.

Dans cette deuxième partie, nous cherchons à identifier les mécanismes économiques de base qui freinent ou accélèrent la marche vers la neutralité carbone. Nous examinerons en dernière partie les leviers d'action pouvant jouer le rôle d'accélérateurs de transition.

Nous commençons par rappeler la feuille de route de la neutralité carbone qui implique de retrouver une circularité du cycle du carbone, mise à mal par deux siècles d'exploitation des énergies fossiles. Cela exige de marcher sur les deux jambes : réduire les émissions brutes et renforcer les puits de carbone que sont l'océan et la biosphère. Les travaux du GIEC nous rappellent que ces transformations doivent être conduites à marche forcée dès les prochaines décennies ([chapitre 5](#)).

En deux siècles, les énergies renouvelables sont devenues de simples auxiliaires des sources fossiles. Dans un grand mouvement de bascule, elles vont reconstituer l'armature du système énergétique de demain. Amorcé par des investissements à la production, leur déploiement est stimulé par la baisse de leurs coûts

de production qui tombent en dessous de ceux des sources fossiles (et nucléaires). Son rythme va dépendre des investissements matériels et immatériels permettant de distribuer ces nouvelles sources au plus grand nombre et de la géopolitique des renouvelables qui repose en amont sur le contrôle de certains métaux et en aval sur la maîtrise des réseaux ([chapitre 6](#)).

Les fossiles font et feront de la résistance. Leur industrie coagule de puissants intérêts aux nombreuses ramifications politiques. Leurs gains de productivité surprennent régulièrement. Les rentes sont réinvesties dans les réserves économiquement exploitables, ce qui allonge leur espérance de vie. Pour retirer les sources fossiles du système énergétique, il faut casser cette dynamique des rentes qui conduit à une accumulation massive d'actifs qui devront être déclassés rapidement. La facture à régler pour ces actifs « échoués » et les reconversions en découlant constituent le problème principal du financement de la transition. Qui va régler cette facture ([chapitre 7](#)) ?

L'efficacité énergétique permet d'utiliser moins d'énergie pour obtenir un service identique. Son rôle dans la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> est surestimé dans les scénarios qui n'accordent pas suffisamment d'importance à un mécanisme clé du fonctionnement de notre système économique : l'impact de la baisse des prix relatifs qui fait rebondir les quantités consommées. Pour atteindre vite la neutralité carbone, il faut contrôler cet « effet rebond » en redistribuant différemment les gains de productivité. Une redistribution qui a une dimension d'équité primordiale tant est profonde l'inégalité des conditions d'accès à l'énergie dans le monde ([chapitre 8](#)).

Nous terminons cette partie en nous intéressant au carbone vivant qui assure, via la photosynthèse, le fonctionnement des puits

de carbone. La protection des puits de carbone constitue la deuxième jambe de la marche vers la neutralité carbone. Elle concerne les océans et les terres émergées. Sur terre, la transition agroécologique est la clé d'un changement d'usage des sols favorables au stockage du CO<sub>2</sub> et à la maîtrise des émissions de méthane et de protoxyde d'azote. Ses voies sont plus complexes à trouver que celles de la sortie des fossiles en raison des contraintes pesant sur l'offre et des dynamiques de la demande alimentaire. Outre ses bénéfices climatiques, l'agroécologie permet de mieux s'adapter aux changements du climat et de lutter contre l'affaiblissement de la biodiversité ([chapitre 9](#)).

## CHAPITRE 5

# LES DEUX JAMBES DE LA NEUTRALITÉ CARBONE

Avant d'apparaître à l'article 4 de l'accord de Paris, le concept de neutralité carbone a été utilisé sur le plan microéconomique dans le cadre de la compensation carbone. D'où, parfois, une certaine confusion dans les termes, peu propice à la bonne compréhension des enjeux. Nous commençons le chapitre en rappelant comment fonctionne la compensation carbone à partir de l'exemple du transport aérien. Il apparaît rapidement que le terme de neutralité carbone n'a pas du tout la même signification, suivant qu'on l'applique à la compensation microéconomique ou à l'échelle globale.

L'objectif de neutralité carbone globale vise à stabiliser le stock de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. C'est un objectif très ambitieux, consistant à rétablir la circularité du cycle global du carbone. Cette circularité exige que nos sociétés réduisent drastiquement leurs rejets de gaz à effet de serre et renforcent la capacité d'absorption des puits de carbone naturels, le cas échéant avec l'appoint de techniques industrielles de captage et de séquestration du CO<sub>2</sub> atmosphérique. Quand on traduit cet objectif dans les politiques climatiques, comme cela devient la règle en

Europe, cela rehausse la contrainte en termes de réduction des émissions brutes.

La feuille de route de la neutralité carbone repose sur deux jambes : reconstruire un système énergétique et industriel qui fonctionne sans émettre de CO<sub>2</sub> ; organiser les ressources agricoles et forestières pour protéger le puits de carbone terrestre et réduire les émissions hors CO<sub>2</sub>. Le dernier rapport du GIEC nous rappelle combien le calendrier est tendu. Pour limiter le réchauffement à 1,5 °C, il faut atteindre la neutralité dès 2050 (2070 pour 2 °C), et sans doute passer en régime d'émissions négatives ensuite. Pour ne pas perdre le pari de la neutralité carbone, le pic des émissions mondiales doit avoir été atteint dès 2020 et le budget carbone global se compte en quelques décennies.

## **COMPENSER UN VOL DE 900 000 KM !**

Avant l'accord de Paris, le terme de neutralité carbone a été utilisé dans le cadre de démarches de compensation. Il s'agit alors de limiter l'empreinte climatique d'un acteur au moyen de projets qui peuvent soit stocker du CO<sub>2</sub> atmosphérique (plantation de forêt généralement), soit réduire d'autres émissions (par exemple grâce à l'utilisation d'énergie renouvelable). Si les projets conduits au titre de la compensation équilibrent le montant des émissions de l'acteur, on dira qu'il est « neutre en carbone » : ses émissions ont été intégralement compensées.

Supposez que vos émissions de gaz à effet de serre soient celles d'un « Français moyen » : l'équivalent de 7 tonnes de CO<sub>2</sub> en 2018. Vous voulez ramener votre empreinte carbone à zéro. À court terme, vous ne savez pas réduire vos émissions en dessous de 3 tonnes. Pour viser la « neutralité carbone », vous avez la possibilité de

recourir à la compensation carbone en investissant dans un projet qui réduit de 3 tonnes les émissions d'un autre acteur. Si vous passez par un prestataire homologué de compensation, il certifiera la réduction de ces 3 tonnes. Votre empreinte aura été neutralisée.

Cette technique de compensation est couramment utilisée dans le transport aérien. Imaginons le cas de deux négociateurs du climat ayant participé à toutes les conférences climatiques. La première, la COP1, s'est tenue à Berlin en 1995, après l'entrée en vigueur de la Convention Climat des Nations unies de 1992<sup>1</sup>. En 2018, Katowice a accueilli la COP24, la dernière prise en compte dans notre calcul. Le premier négociateur représente la France. Le second, les îles Fidji. Du fait de sa grande vulnérabilité face à la montée du niveau de la mer, cet archipel du Pacifique cherche à se faire entendre parmi les ténors de la négociation.

Pour se rendre aux 24 rendez-vous annuels de fin d'année, le négociateur représentant la France a accumulé 215 000 km. Seule la COP21 s'est tenue à Paris en 2015, à l'invitation de la France qui présidait la conférence. Les autres années, il a dû se déplacer, parfois très loin : Kyoto (COP3), Bali (COP13), Lima (COP20)... Le compteur a tourné encore plus rapidement pour son collègue représentant les îles Fidji : entre 1995 et 2018, une COP sur deux s'est tenue en Europe, aux antipodes de l'océan Pacifique. Et quand les Fidji ont présidé la conférence en 2017, la COP s'est tenue en Allemagne, car l'archipel ne dispose pas d'infrastructures suffisantes pour accueillir une conférence de l'envergure des COP. Résultat : ce sont 686 000 km qui ont été parcourus par le négociateur fidjien depuis la conférence initiale de Berlin, en 1995.

Au total, les deux négociateurs ont parcouru 900 000 km, 22 fois le tour de la Terre, pour se rendre à l'ensemble des COP. Une bonne façon de voir du pays d'après les commentaires sarcastiques des

sceptiques du climat. Il ne s'agissait pourtant pas de voyages d'agrément. Pour réduire l'empreinte climatique de ces vols professionnels, les deux négociateurs ont cependant décidé de les rendre « neutres en carbone » en faisant l'effort de les compenser avec leurs deniers personnels.

En 1995, il n'était pas aisé de compenser ses émissions. Le premier projet de compensation carbone référencé remonte à 1989. Il concernait une compagnie électrique californienne (AES) qui décida de planter des milliers d'hectares de forêt au Guatemala pour compenser les émissions d'une centrale électrique thermique<sup>2</sup>. La pratique se diffusa dans les années 2000. Des icônes du monde du spectacle, comme les Rolling Stones, le groupe Coldplay ou Brad Pitt ont mis leur notoriété au service de ce type de démarche. Le protocole de Kyoto, entré en vigueur en 2005, a joué un rôle décisif. Il a formalisé les règles de base à utiliser pour les démarches de compensation en élargissant considérablement la gamme des projets pouvant être utilisés.

Aujourd'hui, il est très facile de compenser ses émissions. Le négociateur français peut trouver sur le site d'Air France un calculateur lui permettant de compenser ses vols au tarif de 22 € par tonne de CO<sub>2</sub> émise. L'ensemble des vols dus aux conférences climatiques ayant représenté des émissions de l'ordre de 40 tonnes, il lui en coûtera 880 euros. Une somme abordable pour son budget. Son homologue fidjien ne trouvera pas de calculateur sur le site de Fidji Airways. La compagnie a bien lancé son propre programme de compensation en 2017, en s'engageant à planter un arbre pour chaque décollage d'avion. Elle mobilise pour cela son personnel dans un projet de reconstitution d'une mangrove locale, sans faire appel à ses clients<sup>3</sup>. En passant par un opérateur du marché, le négociateur des Fidji peut compenser ses émissions trois fois



supérieures à celles de son collègue français. La facture est plus salée. À 22 € la tonne, elle atteint 2 800 €, soit à peu près son salaire mensuel.

## **UNE NOTION AMBIGUË À L'ÉCHELLE MICROÉCONOMIQUE**

Au total, ce sont 3 680 € que nos négociateurs ont réglé pour rendre neutres en carbone les vols les acheminant vers les conférences climat. Comment a été utilisée cette somme ? Elle a été dirigée, par des canaux normalement certifiés, vers des projets réducteurs d'émission conduits en partenariat avec des ONG locales. Environ la moitié des projets de compensation concerne la forêt ou l'agroforesterie, dans leur grande majorité en forêts tropicales. Un quart est destiné à accroître l'efficacité énergétique, notamment en améliorant les foyers traditionnels utilisés pour la cuisson. Le reste se partage entre des projets stimulant le développement des énergies renouvelables et le traitement des déchets.

Pratiquée à l'échelle individuelle, la neutralité carbone est un moyen de financer des projets réducteurs d'émission. Si ces projets sont innovants et réduisent effectivement les émissions à l'échelle microéconomique, c'est toujours cela de gagné pour le climat. Le risque est que la compensation soit utilisée par celui qui la pratique pour se dédouaner de ses responsabilités en justifiant les comportements fortement émetteurs, comme le fait de prendre l'avion. C'est pourquoi les échanges de crédits de compensation sont parfois comparés au commerce des « indulgences » qui permettait au Moyen Âge de gagner son paradis tout en continuant à commettre discrètement ses péchés.

La grande limite de la compensation carbone est qu'elle ne réduit pas les émissions de gaz à effet de serre, mais se contente de les déplacer. La « neutralité carbone » obtenue à l'échelle microéconomique grâce à ce type de méthode est donc un concept assez ambigu qui peut tromper son monde. C'est pourquoi l'outil de la compensation est d'une utilisation délicate sitôt qu'on l'utilise dans le cadre de politiques d'atténuation du changement climatique.

L'Organisation de l'aviation civile internationale (OACI) a par exemple décidé en octobre 2016 de réguler les émissions de CO<sub>2</sub> des vols internationaux à partir de 2020 en ayant recours à la compensation<sup>4</sup>. Le dispositif, connu sous l'acronyme de CORSIA, a été présenté comme une grande avancée, car cette catégorie d'émission échappait auparavant à toute régulation. Penchons-nous sur ce qui est effectivement prévu. Jusqu'en 2050, les compagnies aériennes devront compenser l'accroissement de leurs émissions de CO<sub>2</sub>, relativement à 2020. La nouvelle régulation les autorise à accroître autant qu'elles le souhaitent leurs émissions, à condition de les compenser. Ce n'est pas avec ce genre de mesure qu'on risque d'atteindre la neutralité carbone globale à cet horizon ! Nous y reviendrons au [chapitre 8](#).

D'une façon plus générale, il y a totale discontinuité entre les approches microéconomiques de la neutralité carbone obtenue à partir de techniques de compensation et celle que vise l'accord de Paris. Le même terme recouvre des réalités très différentes, ce qui peut prêter à des contresens.

Sur le plan microéconomique, la pratique de la compensation suppose qu'il existe un autre acteur pouvant réduire ses émissions ou absorber le CO<sub>2</sub>. Imaginons que la pratique se généralise. Si chacun continue d'émettre et cherche à compenser, où trouver le réservoir de réduction d'émission pour compenser ? La neutralité

carbone globale ne peut s'obtenir par agrégation de comportements microéconomiques de compensation. Elle implique des ruptures bien plus draconiennes dans le fonctionnement de nos sociétés. Il s'agit de rééquilibrer le cycle global du carbone, en lui conférant une nouvelle circularité par égalisation des émissions et des absorptions. Une opération qui intervient à contre-courant de ce que font les sociétés humaines depuis maintenant deux siècles.

## **LA NEUTRALITÉ CARBONE DE LA PLANÈTE : UN OBJECTIF D'ÉCONOMIE CIRCULAIRE**

Commençons par un peu d'arithmétique. Sur les trois années 2015 à 2017, les rejets anthropiques de l'ensemble de ces gaz ont été d'environ 52 milliards d'équivalent CO<sub>2</sub> par an (Gt/an). La combustion d'énergie fossile en a rejeté 38 Gt/an, et l'agriculture et la forêt de l'ordre de 11 Gt/an. Le reliquat provient du CO<sub>2</sub> rejeté par voie chimique lors de la fabrication du ciment et des rejets de gaz non CO<sub>2</sub> en dehors de l'agriculture.

Sur la même période, les rejets du seul CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère ont été de 41 Gt/an. D'après le Global Carbon Project, un peu moins de la moitié a été absorbée par la biosphère et les océans. Le solde, un peu supérieur à 21 Gt/an, a rejoint le stock qui s'accumule dans l'atmosphère en accroissant l'effet de serre<sup>5</sup>.

L'arithmétique de la neutralité carbone nous ramène aux fondamentaux de l'économie circulaire : deux siècles d'exploitation de la ressource fossile ont créé un déséquilibre majeur du cycle du carbone. Sur 2 tonnes de CO<sub>2</sub> rejetées dans l'atmosphère, les puits naturels ne sont plus capables de n'en absorber qu'une seule. La neutralité carbone consiste à refermer le cercle en ramenant les rejets de gaz à effet de serre résiduels au niveau des capacités

d'absorption des deux puits de carbone océanique et terrestre, éventuellement renforcés par l'appoint de techniques industrielles de captage et de stockage. Et si on ne parvient pas à atteindre dans les temps cette neutralité, il faudra ensuite faire en sorte que les puits absorbent davantage de CO<sub>2</sub> que n'en émettent les terriens. Passer en régime d'émissions négatives.

La transition énergétique, telle qu'on la définit habituellement, vise à éliminer, ou du moins à drastiquement réduire, les rejets de CO<sub>2</sub> provoqués par la combustion des énergies fossiles qui représentent deux tiers des émissions mondiales. C'est une condition nécessaire, mais loin d'être suffisante, pour viser la neutralité carbone. La transition agroécologique qui concerne l'agriculture et la forêt revêt une importance tout aussi stratégique.

L'agriculture et la forêt (avec le traitement des déchets qui en sont le maillon terminal) représentent un peu plus du quart des rejets mondiaux de gaz à effet de serre. L'agriculture et l'élevage constituent les premières sources d'émission de méthane et de protoxyde d'azote, les deux principaux gaz à effet de serre non CO<sub>2</sub>. Il n'est pas facile de diminuer rapidement ces émissions sans affecter les approvisionnements alimentaires. Les changements d'usage des sols, la déforestation tropicale à titre principal, rejettent du CO<sub>2</sub> auparavant stocké dans la biosphère. L'intervention humaine ampute par ce biais d'un peu plus de 5 Gt/an la capacité d'absorption du puits de carbone continental.

Transition énergétique et organisation des ressources agricoles et forestières ne sont pas indépendantes. Pour réduire les sources d'énergie fossile, on peut accroître la pression sur le milieu naturel, notamment en développant des bioénergies. Par exemple, si on remplace le charbon des centrales électriques par du bois, ceci implique un prélèvement accru sur les forêts. Si on substitue aux

carburants d'origine fossile des biocarburants obtenus à partir de productions supplémentaires d'oléagineux ou de céréales, il faut davantage exploiter les sols agricoles. Pour obtenir ces productions supplémentaires, il peut être tentant d'accroître les doses de produits chimiques, en particulier celles d'engrais azotés qui vont générer des émissions de protoxyde d'azote. Le biogaz est intéressant, car il offre un substitut au gaz d'origine fossile. On peut le produire à partir du traitement des sous-produits agricoles, mais aussi à partir de cultures intensives elles-mêmes émettrices. Enfin, pour répondre à l'accroissement de la demande alimentaire qui est forte dans les pays en développement, on peut augmenter la proportion des produits animaux (viande et produit laitier) à empreinte carbone élevée.

Ces types d'ajustement risquent fort de provoquer un accroissement des émissions de gaz hors CO<sub>2</sub> dont l'agriculture est déjà le principal émetteur, tout en altérant la capacité du milieu naturel à absorber puis stocker le CO<sub>2</sub> de l'atmosphère. *A contrario*, si les changements de pratiques agricoles freinent les émissions de gaz à effet de serre hors CO<sub>2</sub> et renforcent la capacité de stockage du CO<sub>2</sub> atmosphérique, la transition énergétique conduira plus rapidement à la neutralité carbone globale.

C'est pourquoi la marche vers la neutralité carbone repose sur deux jambes : la reconfiguration du système énergétique et la réorganisation des ressources agricoles et forestière. Le carbone fossile et le carbone vivant.

## **PUITS DE CARBONE NATURELS ET ARTIFICIELS**

Quand on évoque le rôle des puits de carbone, le réflexe est souvent de songer aux techniques de captage et de stockage du

carbone, plus connues sous l'acronyme de CCS (Carbon Capture and Storage). Elles consistent à capturer le CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère, puis à le réinjecter dans des réservoirs souterrains, aquifères profonds ou autres. Si une partie du CO<sub>2</sub> peut être réutilisée, on parle alors de CCUS (Carbon Capture Utilisation and Storage).

Dans les scénarios bas carbone de l'Agence internationale de l'énergie (AIE), le déploiement de ces techniques à grande échelle intervient à partir de 2030. C'est un peu une astuce permettant de mettre le scénario normatif en cohérence avec l'objectif de décarbonation du système énergétique. Les conditions économiques et sociales d'un tel déploiement ne sont pas explicitées. Si on installe des équipements de CCS à la sortie de centrales fonctionnant à la biomasse renouvelable, on peut fabriquer de l'électricité ou de la chaleur avec un bilan d'émissions nettes négatives. Certains scénarios répertoriés par le GIEC misent sur le déploiement à grande échelle de telles techniques après 2050. Nous y reviendrons plus en détail au [chapitre 9](#).

Dans les scénarios les plus audacieux de l'AIE, on parvient à l'horizon 2040 à enfouir un peu plus de 2 milliards de tonnes de CO<sub>2</sub> dans le sous-sol, grâce au stockage géologique. C'est environ 10 % de ce qu'absorbent chaque année l'océan et la biosphère. Même si on retient les hypothèses les plus audacieuses en matière de déploiement de la CCS, l'enjeu primordial des prochaines décennies concerne les puits de carbone naturels que l'activité humaine peut altérer ou renforcer.

Les océans sont, de très loin, le premier réservoir de la Planète stockant du carbone. La capacité d'absorption de l'océan est conditionnée par la présence des algues qui, à l'instar des autres végétaux, capturent le carbone via la photosynthèse et permettent sa lente descente vers les fonds marins où il se transforme en

sédiments<sup>6</sup>. Le fonctionnement de la pompe à carbone océanique repose ainsi sur la biodiversité marine qui est, elle-même, fragilisée par le réchauffement ([chapitre 3](#)). Elle peut également être déstabilisée par certaines activités humaines, la surpêche ou l'accumulation des rejets de matières plastiques par exemple. Ces mécanismes sont imparfaitement connus. La protection de la pompe à carbone océanique exige un effort de recherche pour mieux comprendre son fonctionnement afin d'identifier les actions efficaces à conduire.

Comme pour l'océan, c'est l'activité photosynthétique des végétaux qui conditionne le transfert du CO<sub>2</sub> atmosphérique dans la biosphère. Quand les plantes ont un cycle annuel de reproduction, elles captent le CO<sub>2</sub> au printemps, pendant la phase de croissance, pour le rejeter à l'automne. Le bilan est globalement neutre si on ne tient pas compte des échanges possibles entre la plante et le sol. Pour les plantes pérennes, le cycle d'absorption-rejet du carbone s'étend sur des décennies, des siècles pour les espèces comme le chêne, voire des millénaires pour quelques individus d'exception comme certains oliviers de Crète ou le pin Huon de Tasmanie.

Chaque année, ce sont de 4 à 6 Gt de CO<sub>2</sub> qui partent en fumée, principalement du fait de la déforestation tropicale qui constitue désormais le principal front de déforestation dans le monde. Une accélération des défrichements pour accroître les surfaces utilisées pour les cultures ou l'élevage aggraverait cette altération du puits de carbone terrestre. Inversement, une protection de ces puits aurait un impact bénéfique majeur. Richard Houghton et Alexander Nassikas ont estimé le potentiel de CO<sub>2</sub> qui pourrait être stocké en interrompant la déforestation et les prélèvements opérés sur ses ressources<sup>7</sup>. Leur conclusion principale est que l'arrêt de la déforestation sous les tropiques, couplé à un meilleur stockage des

bois prélevés dans les forêts tempérées, permettrait d'absorber d'ici la fin du siècle l'équivalent de 13 années d'émission de CO<sub>2</sub> d'origine fossile. La majorité de ces absorptions interviendraient d'ici 2050, ce qui faciliterait grandement l'atteinte de la neutralité carbone à mesure que l'on retirera les sources fossiles du système énergétique.

Comme on le verra plus en détail au [chapitre 9](#), ces mouvements de forestation-déforestation sont conditionnés par la plus ou moins grande pression de l'agriculture qui, elle-même, peut stocker ou déstocker du carbone suivant la façon dont elle est conduite. L'évolution des pratiques agricoles joue donc un rôle pivot dans le fonctionnement du puits de carbone terrestre.

## **QUELLE FEUILLE DE ROUTE ?**

En introduction de la seconde partie, les formulations de l'article 4 de l'accord de Paris nous semblaient encore un peu hermétiques. Nous sommes maintenant en mesure de décliner la feuille de route de la neutralité carbone. Il s'agit d'opérer une double transformation :

- basculer de la mécanique de l'empilement des sources d'énergie qui a supporté le développement de nos sociétés durant deux siècles vers une logique de substitution permettant de retirer au plus vite les sources fossiles de notre système énergétique ;
- réorganiser les ressources agricoles et forestières pour réduire, autant qu'il est possible, les émissions de méthane et de protoxyde d'azote, et renforcer la capacité du milieu naturel à absorber le CO<sub>2</sub> de l'atmosphère.

Pour être opérationnelle, notre feuille de route doit comporter des objectifs chiffrés. Cela pose quelques difficultés d'application. Elles



ne sont pas nouvelles, car le calcul des émissions et absorptions liées au carbone vivant est horriblement complexe dans les détails.

En France, l'introduction de l'objectif de neutralité carbone à la place du « facteur 4 » a ainsi créé des remous début 2019. Le gouvernement a été suspecté de passer d'un objectif chiffré de réduction d'émissions brutes, défini avec précision dans la loi, à une cible plus floue et peut-être moins ambitieuse<sup>8</sup>. Les travaux réalisés par une commission dirigée par un haut fonctionnaire (Alain Quinet), mais composée d'experts indépendants, suggèrent pourtant que ce passage rehausse l'ambition de la politique d'atténuation : viser l'objectif de neutralité carbone en 2050 équivaut, d'après la Commission Quinet, à passer d'un « facteur 4 » à un « facteur 6 à 7 » suivant l'hypothèse retenue sur l'évolution du puits de carbone terrestre<sup>9</sup>.

De façon plus générale, fixer les objectifs d'atténuation en termes de neutralité carbone pose des questions épineuses d'application, car l'accord de Paris ne comporte pas de dispositions contraignantes en matière de calcul et de *reporting* des émissions et absorptions. En l'absence de règles homogènes et strictement appliquées, les parties à l'accord peuvent maintenir un grand flou sur leurs contributions respectives à l'atteinte de l'objectif global. Pire, elles peuvent consacrer beaucoup de temps à discuter les modalités de leur calcul, en retardant le passage à l'action.

Pour compléter la feuille de route, il faut non seulement des chiffres, mais aussi un calendrier. Sur le plan global, les travaux du GIEC, notamment son rapport spécial sur le réchauffement à 1,5 °C, fournissent les repères dont nous avons besoin. Le rapport 1,5 °C a passé au crible l'ensemble des scénarios de baisse d'émission de CO<sub>2</sub> conduisant à la neutralité carbone, en les classant suivant les cibles de température visées. La définition de la neutralité carbone

retenue n'est pas strictement identique à celle de l'article 4, car elle ne concerne que le CO<sub>2</sub>. Mais ses enseignements en constituent de loin le meilleur proxy existant.

D'après le rapport 1,5 °C, il faut atteindre la neutralité carbone dès 2050 pour avoir deux chances sur trois de stabiliser la température à 1,5 °C au-dessus de l'ère préindustrielle. Pour une cible de 2 °C, on dispose d'une vingtaine d'années supplémentaires. Dans la majorité des scénarios, le budget carbone global a été consommé avant l'échéance. Il faut donc aller au-delà de la neutralité en suivant un régime d'émission négative après l'atteinte de la neutralité. Le climat contraint les sociétés humaines à opérer en quelques décennies une transition que les seules contraintes géologiques et de pollutions locales auraient sans doute étalée sur une période bien plus longue.

Fixer le point d'arrivée, c'est bien, mais depuis quel point de départ ? Réponse du GIEC : le départ doit être imminent ! Plus on tarde, plus il sera difficile de rattraper ensuite le temps perdu. Les trajectoires d'émission requises pour limiter le réchauffement à 2 °C ou 1,5 °C impliquent que le pic des émissions mondiales a été atteint dès 2020, un scénario encore hypothétique du fait de la reprise des émissions mondiales de CO<sub>2</sub> observée en 2017 et 2018. Une reprise intervenue alors même que la bascule vers les sources d'énergie solaire et éolienne semble s'accélérer.

## CHAPITRE 6

# LA BASCULE VERS LES RENOUVELABLES

L'exploit d'Archimède réussissant, lors du siège de Syracuse (212 avant J.-C.), à couler à distance les galères romaines à l'aide de miroirs paraboliques ressort probablement de la légende. Le mathématicien grec reste néanmoins le premier d'une longue lignée de visionnaires à avoir tenté de domestiquer l'énergie du soleil.

En 1912, l'ingénieur Frank Shuman s'installe à Méadi, dans la vallée du Nil. Il y déploie la première centrale solaire au monde qui alimente un système de pompes puisant l'eau du fleuve à des fins d'irrigation. Quelques années plus tard, il ne craint pas d'écrire dans le *New York Times* : « Nous avons en particulier prouvé que lorsque nos stocks de pétrole et de charbon seront épuisés, la race humaine pourra recevoir une énergie illimitée depuis les rayons solaires<sup>1</sup>. » Sauf que les méfaits du premier conflit mondial et la baisse des prix des énergies fossiles auront raison de ses projets : visionnaires, mais non compétitifs !

Même punition pour les industriels qui parsèment le désert de Mojar de fermes solaires au lendemain des chocs pétroliers de 1973 et 1980. Victimes du contrechoc qui s'enclenche ensuite, les fermes sont soutenues par les subventions de l'État californien. Cela n'a qu'un temps. L'addition est trop lourde pour le contribuable. Avec

l'arrêt des subventions, l'élan du solaire est à nouveau cassé. Tout au long du xx<sup>e</sup> siècle, une sorte de malédiction semble poursuivre le solaire et l'éolien, deux techniques pour capter les énergies de flux. Leur déploiement se heurte à la contrainte des coûts de production et à celle du stockage de l'électricité. L'envahissement des sources fossiles repousse aux marges ces énergies de flux, pourtant utilisées de façon ancestrale, avec la navigation à voile et l'utilisation des moulins dans les civilisations antiques.

Le professeur Jacques Percebois, qui a formé des générations d'étudiants à l'économie de l'énergie, a rédigé en 1975 un ouvrage sur l'énergie solaire alors « considérée comme très marginale ». Il y écrit de façon prémonitoire qu'en « faire une source parmi d'autres dans le cadre d'un système énergétique cohérent peut sembler encore utopique », mais que « précisément, peut-être faut-il à ce jour compter sur la stratégie de l'«utopie dynamisante» pour la promouvoir »<sup>2</sup>. On ne peut être plus visionnaire. Après deux décennies durant lesquelles les fossiles ont encore accru leur emprise, le xxi<sup>e</sup> siècle va connaître un mouvement de bascule de sens opposé. La baisse des coûts du solaire et de l'éolien à la production, couplée à celle du stockage de l'électricité, est en train de renverser la situation. À la production, ces sources deviennent compétitives face aux fossiles (et au nucléaire). Leur déploiement ne peut qu'en être facilité. Tout l'enjeu pour le climat est de savoir à quel rythme il s'effectuera.

Dans ce chapitre, nous examinons les mécanismes économiques susceptibles d'accélérer la bascule vers les renouvelables et la nouvelle géopolitique dans laquelle ils s'inscrivent. Mais avant d'aborder cette économie des énergies renouvelables, effectuons une escapade romanesque où il est question de soleil, de panneaux et d'argent.

## LES PANNEAUX SOLAIRES DU PROFESSEUR BEARD

Dans son roman *Solaire*, Ian McEwan nous conte les aventures d'un certain Beard, physicien nobélisé, dont la vie est singulièrement compliquée par une suite de déconvenues affectives et... la poursuite de projets grandioses en matière d'énergie solaire. Notre professeur a l'ambition de transformer le monde grâce à une technologie photovoltaïque organique, une sorte de photosynthèse artificielle produisant une énergie illimitée. Transformer le monde, mais aussi garnir son portefeuille comme il le rappelle à son associé : « Du soleil plus de l'eau et de l'argent égale de l'électricité, et donc encore plus d'argent, l'ami. On touche au but. »

Pour trouver l'argent, Beard doit venir à bout des hésitations d'investisseurs qu'il a convoqués pour une démonstration à Lordsburg dans le Nouveau-Mexique. Accoudé au comptoir d'un bar local, il doit aussi répondre aux interrogations de son associé subitement pris de doutes la veille de la démonstration : « Au fait, Chef, avec moi tu peux parler franchement. Dis-moi, c'est vrai que la Planète se refroidit ?

– Quoi ?

– Tu répètes sans arrêt qu'il n'y a plus de discussion possible, mais si. On n'entend que ça. La semaine dernière, une femme professeure d'études atmosphériques ou quelque chose comme ça en parlait encore à la télé.

– Quoi qu'elle prétende être, elle se trompe.

– On en parle aussi beaucoup dans les milieux d'affaires. Ça fait de plus en plus de bruit. Les scientifiques se seraient trompés, mais refuseraient de l'admettre. Trop de carrières et de réputations en jeu.

– Où sont les preuves ?

– Il paraît qu'une hausse de zéro degré sept depuis l'ère préindustrielle, c'est-à-dire deux siècles et demi, est négligeable et

ne dépasse pas les fluctuations habituelles. Et que les températures des dix dernières années ont été plus basses que la moyenne... Si la Planète ne se réchauffe pas, on est foutus.

[...]

– Tu n’es toujours pas convaincu ? Prenons le pire scénario. Imaginons l’impossible : les données ne sont pas fiables. Il n’y a pas de réchauffement. Les chercheurs ont des hallucinations collectives ou bien il s’agit d’un complot. Dans ce cas, il reste les arguments de toujours : sécurité énergétique, pollution atmosphérique, pic de production pétrolière.

– Personne ne va nous acheter des panneaux sophistiqués simplement parce qu’une pénurie de pétrole interviendra dans trente ans.

– Qu’est-ce qui t’arrive ? Des problèmes conjugaux ?

– Pas du tout. C’est juste que je me démène, et ensuite des types en blouse blanche viennent dire à la télé que la Planète ne se réchauffe pas. Ça me fait flipper. »

Beard posa la main sur le bras de son ami, preuve certaine qu’il avait bu plus que de raison. « Écoute, Toby. La catastrophe est imminente. Détends-toi<sup>3</sup> ! »

*Solaire* est publié en 2010 au Royaume-Uni. À l’époque, les prix de soutien à la production de l’électricité photovoltaïque sont en Europe pratiquement triples de ceux des marchés de gros. Dans les appels d’offre internationaux sur les projets situés dans les zones les plus ensoleillées, il faut trouver des acheteurs qui s’engagent sur des prix bien supérieurs à ceux de l’électricité produite localement à partir des sources traditionnelles (fossiles ou autres). On comprend l’angoisse du professeur Beard et de son associé : pour convaincre les investisseurs, il faut des arguments solides. Le changement climatique semble être le seul qui soit à la hauteur. Comme l’exprime

McEwan avec un humour très britannique, la catastrophe, pour eux, ce serait que le réchauffement s'arrête ou qu'il ait été le produit d'une hallucination collective. Faute d'investisseurs convaincus, ils feraient alors faillite.

Si McEwan réécrivait *Solaire* en 2020, il retoucherait probablement le dialogue entre Beard et son associé. En une décennie, la toile de fond de son roman a bien changé. Les coûts à la production de l'énergie produite par l'éolien et le solaire tendent à systématiquement passer en dessous de ceux des énergies fossiles (ou nucléaires). Parallèlement, la baisse du coût du stockage de l'électricité multiplie ses usages potentiels, notamment pour la mobilité. Ce regain de compétitivité des énergies de flux modifie radicalement les perspectives de leur déploiement. C'est un mouvement historique.

## **ÉNERGIES DE STOCK, ÉNERGIES DE FLUX ET BIOÉNERGIES**

L'industrie des fossiles et du nucléaire repose sur l'utilisation de l'énergie présente dans un stock d'où est extraite une matière première qui s'épuise à mesure de son utilisation. L'industrie des renouvelables convertit l'énergie issue de flux naturels pour la rendre utilisable par les hommes. Ces flux peuvent être le courant des rivières (hydraulique), les courants marins (énergies marines), le flux provenant des écarts de température dans la croûte terrestre (géothermie), le vent (éolien) ou le soleil (solaire).

Ces énergies de flux sont utilisées depuis très longtemps à l'échelle locale, avec des modes de production artisanaux. Les premiers usages à grande échelle de ces énergies ont consisté à ériger des barrages sur des rivières. L'hydraulique a pris une avance sur les autres sources renouvelables. En 2017, elle a été à l'origine

de près des deux tiers de la génération d'électricité renouvelable, loin devant l'éolien et le solaire. Les grands barrages y jouent un rôle prépondérant à l'image de celui des trois gorges en Chine, la plus grosse unité de production d'énergie jamais construite, avec une capacité installée (22,5 GW) équivalente à celle de treize centrales EPR du type Flamanville. Le gigantisme de telles installations génère de multiples dégradations sous l'angle environnemental et social qui cristallisent des oppositions et limitent leur potentiel de développement.

La biomasse a été la source dominante d'énergie utilisée par les terriens jusqu'à l'avènement de l'ère des fossiles. Cette source d'énergie est à mi-chemin entre les énergies de flux et de stock : elle prélève bien dans un stock de matière vivante (principalement bois et cultures fourragères ou énergétiques pour le transport), mais ce stock est lui-même renouvelé grâce au flux du soleil via la photosynthèse. La bioénergie est donc renouvelable tant que les prélèvements effectués dans le milieu naturel sont inférieurs à sa capacité de régénération. Elle ne l'est plus dans le cas inverse. Les bioénergies sont encore la première source d'énergie utilisée dans le monde, après les trois sources fossiles. En 2017, elles ont contribué à 14 % de l'approvisionnement énergétique mondial<sup>4</sup>.

La bascule vers un système énergétique neutre en carbone implique une mobilisation de l'ensemble des énergies de flux et de la bioénergie qui ont été marginalisées par l'empilement des sources fossiles depuis deux siècles. Nous reviendrons plus en détail sur les bioénergies au [chapitre 9](#). Dans ce chapitre, nous nous concentrons sur les deux énergies de flux dont les conditions de production ont été radicalement modifiées durant la décennie 2010 : l'éolien et le solaire.



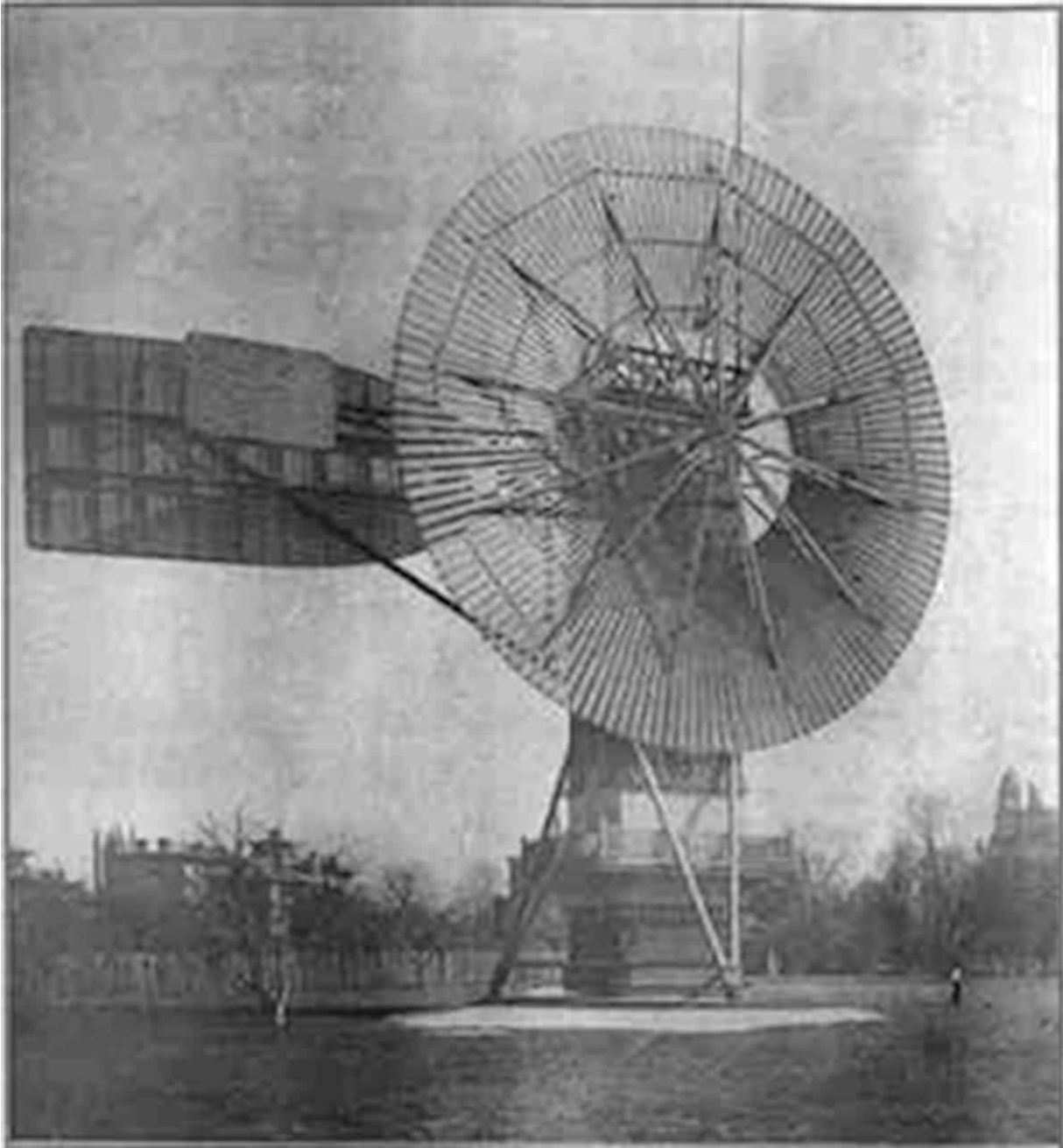
## ÉOLIEN : LE FACTEUR 1 000

L'énergie du vent est utilisée depuis très longtemps pour la navigation et le travail du grain à l'aide de voiles et de moulins. Au <sup>xix</sup><sup>e</sup> siècle, des engins préfigurant les éoliennes modernes apparaissent dans les campagnes pour pomper de l'eau et abreuver les troupeaux. Le premier à coupler l'énergie du vent à une turbine produisant de l'électricité est l'ingénieur américain Charles Brush qui érige en 1888 à Cleveland une éolienne munie d'un rotor de 17 m de diamètre, comportant 144 pales de bois de cèdre. Un engin impressionnant par sa taille mais d'une efficacité déplorable. À peu près au même moment, le météorologiste danois Poul La Cour couple des moulins à vent et des turbines pour électrifier les campagnes du Jutland à une époque où seule Copenhague dispose d'un véritable accès à l'électricité. Un ancien élève de La Cour, Johannes Juul, érige en 1957 une éolienne à trois pales qui va fonctionner pendant vingt ans à Gedser, tout au sud du royaume. Juul a construit le prototype de ce que seront les éoliennes contemporaines.

Ce ne sont pas des innovations techniques majeures résultant de nouvelles connaissances qui ont révolutionné l'industrie éolienne. Depuis Brush et La Cour, le principe de base est le même : on fait tourner les pales d'un rotor suspendu en l'air et on transforme l'énergie produite en électricité via une turbine située dans la nacelle. Simplement, le rendement obtenu s'est considérablement accru avec le temps. L'engin de Brush, malgré ses dimensions impressionnantes pour l'époque, ne pouvait développer une puissance supérieure à 12 kW. Celui de Juul développait 200 kW. En 2018, une éolienne standard a une puissance de 2 à 3 MW, les prototypes des constructeurs annonçant des puissances de 8 MW sur terre et jusqu'à 12 MW sur mer.

Entre l'engin de Brush et les derniers modèles accrochés à des mats de plus de 150 m de hauteur testés en mer du Nord, la puissance installée a été multipliée par un facteur 1 000. C'est ce changement d'échelle qui fait de l'éolien l'une des sources d'énergie les moins coûteuses à la production sitôt qu'on l'installe dans un couloir suffisamment venteux. D'après les estimations de l'AIE portant sur les moyennes, c'était déjà systématiquement le cas pour les éoliennes à terre en 2017. La même année, le coût du kWh électrique sur mer était encore nettement plus élevé, mais baissait bien plus rapidement que celui fourni par les autres technologies.

**Figure 6.1 L'éolienne de Charles Bush**



*En 1888, Charles Bush construisit la première éolienne destinée à la fabrication du courant. Malgré sa taille imposante, l'engin raccordé à des batteries ne développait qu'une puissance de 12 kW, mille fois inférieure aux prototypes aujourd'hui testés en mer du Nord.*

Source : <http://eolienne-3eme.blogspot.com/p/histoire-de-leolienne.html>

Grâce à la baisse des coûts, l'éolien est moins tributaire de subsides publics, ce qui accélère son déploiement. Les parcs éoliens installés dans le monde ne représentaient en 2018 que 7 % de la puissance installée pour une production de moins de 4 %. Mais la mise en route de nouveaux parcs éoliens a été à l'origine d'un cinquième de l'accroissement des capacités installées de production électrique en 2017 et 2018. C'est pourquoi, dans tous les scénarios prospectifs, l'éolien est, après le solaire, la source d'énergie dont la contribution s'accroît le plus rapidement dans le mix mondial.

Parallèlement à la course à la taille, des gains d'efficacité ont également été réalisés sur les micro-éoliennes qui pourront jouer un rôle d'appoint utile dans certaines applications décentralisées, notamment en complément du photovoltaïque.

## **SOLAIRE : CAPTER LE FLUX D'ÉNERGIE À LA SOURCE**

L'énergie solaire repose également sur l'association de techniques connues depuis longtemps. La voie thermodynamique consiste à utiliser la capacité de réchauffement des rayons solaires. C'est cette technique qu'explora Archimède avec ses miroirs paraboliques. Ses applications peuvent être très décentralisées, comme dans le cas des chauffe-eau solaires. On peut aussi raccorder des miroirs à une tour qui produit de la chaleur pouvant être convertie en électricité grâce à une turbine. On obtient alors une centrale à concentration. Les centrales modernes à concentration s'étalent sur plusieurs dizaines d'hectares et peuvent développer des puissances atteignant plusieurs centaines de MW. On trouve de telles centrales dans des zones bénéficiant de très forts ensoleillements (Chili, Maroc, Californie, Émirats arabes unis). Elles

présentent l'intérêt de ne pas être sensibles aux à-coups de l'ensoleillement à court terme comme l'est le photovoltaïque.

En 1839, le physicien français Edmond Becquerel découvre l'effet photovoltaïque : exposés à la lumière du soleil, les matériaux semi-conducteurs produisent de l'électricité. Becquerel présente son résultat qui passe un peu inaperçu à l'Académie des sciences. En 1883, l'Américain Charles Fritts applique ce résultat en installant sur un toit à Manhattan un panneau dans lequel sont interconnectées des cellules photovoltaïques fonctionnant au sélénium. Le test fonctionne. Mais le rendement déplorable (moins de 1 %) interdit pour longtemps toute exploitation commerciale. Dans les années 1950 et 1960, la recherche et développement bénéficie des retombées de la conquête spatiale : les véhicules spatiaux ont besoin d'électricité et il est ruineux de transporter des charges supplémentaires sous forme de batterie. La solution va être l'utilisation du silicium qui permet dans les années 1950 de porter le rendement des panneaux au-dessus de 10 %. Des rendements supérieurs à 26 % sont aujourd'hui obtenus en laboratoire en utilisant le seul silicium, mais les chercheurs annoncent des rendements supérieurs à 60 % grâce aux techniques dites de « multijonctions<sup>5</sup> ».

Une autre voie pour faciliter la pénétration du photovoltaïque consiste à réduire l'épaisseur des panneaux pour les transformer en couches très minces qui pourraient facilement s'appliquer sur de multiples supports. Ce n'est plus le gain de rendement au m<sup>2</sup> qui porterait alors leur déploiement, mais la facilité de la pose permettant de multiplier le nombre de m<sup>2</sup>.

Les gains du rendement énergétique des panneaux photovoltaïques sont la première composante de la baisse de leurs coûts. Mais la variable déterminante a été, comme pour l'éolien, un

facteur d'échelle concernant non plus la hauteur du mat ou le diamètre du rotor, mais la taille des usines. L'industrie photovoltaïque connaît depuis les années 1970 une baisse de près d'un quart du prix du module photovoltaïque vendu, l'unité de base constituant les panneaux, à chaque doublement de la production. Sur la période récente (2006 à 2018), ce rythme s'est brusquement accéléré avec une baisse de 40 % du prix des modules par doublement de l'échelle de production<sup>6</sup>. Cette accélération correspond au déplacement de l'épicentre de l'industrie mondiale du photovoltaïque vers la Chine où les producteurs, bénéficiant d'un accès quasi gratuit au capital, ont investi dans des usines géantes en réduisant drastiquement les coûts. Cette accélération n'est guère extrapolable. Les usines ne peuvent accroître indéfiniment leur taille. De plus, la majorité des producteurs chinois sont très endettés et peinent à trouver une rentabilité du fait des surcapacités qu'ils ont eux-mêmes provoquées.

Il en résulte un paysage qui change rapidement en matière de coûts de l'électricité à la production. D'après les estimations de l'AIE pour l'année 2017, le coût moyen de l'électricité produite à partir du solaire photovoltaïque était encore en moyenne un peu supérieur à celui de la source fossile la plus compétitive (charbon en Chine et Inde, gaz aux États-Unis et en Europe). Mais dans les projections à l'horizon 2040, le solaire photovoltaïque devient dans tous les scénarios de l'AIE la source d'électricité la moins coûteuse dans le monde, ce qui en réalité est déjà le cas en 2017 lorsque les conditions d'ensoleillement sont très favorables et les projets montés avec efficacité.

Dans tous les scénarios prospectifs, la source solaire est celle qui s'accroît le plus rapidement dans le mix énergétique. Elle permet en effet de capter l'énergie solaire à la source, avant qu'elle ne soit

transformée par la photosynthèse. Son gisement est donc considérable tant que le soleil continue de nous irradier. Cette source approvisionne le système énergétique par deux voies complémentaires. Pour environ 60 % de la puissance installée, le déploiement du solaire s'effectue dans des parcs de grande dimension, à l'image de celui mis en production en 2015 à Cestas dans le Sud-Ouest de la France, le plus grand d'Europe avec ses 980 000 panneaux alignés sur près de 300 ha qui développent une capacité de 300 MW. En Chine et en Inde, les deux pays où les capacités de production photovoltaïques s'élargissent le plus rapidement, les projets les plus importants déploient des capacités de plusieurs milliers de MW. Pour 40 %, le déploiement du solaire s'effectue de façon décentralisée, principalement sous la forme de quelques panneaux installés sur un toit ou une ombrière. L'un des grands atouts du photovoltaïque est sa grande modularité : quelques cellules suffisent à alimenter votre calculatrice. À l'autre extrême, le parc solaire de Bhadia au Rajasthan développera une capacité de 2 225 MW (la puissance de 1,5 EPR type Flamanville) à son achèvement.

À la suite du croisement des courbes de coûts à la production, l'injection de quantités croissantes de sources éoliennes et solaires va remodeler les systèmes énergétiques. Depuis 2017, ces deux sources ajoutent plus de capacité au système électrique que la totalité des sources fossiles et nucléaires. À l'avenir, la vitesse de la bascule vers les renouvelables sera moins tributaire de l'évolution des coûts à la production que de la mobilisation de capital matériel et immatériel pour les acheminer jusqu'aux utilisateurs via des réseaux aux architectures nouvelles. Cette économie des renouvelables s'inscrit dans une géopolitique qui peut accélérer ou freiner la bascule.

## **TAUX DE RETOUR ÉNERGÉTIQUES, CLIMATIQUES, ÉCONOMIQUES**

L'économie des renouvelables repose sur les spécificités des énergies de flux : leur caractère plus capitalistique que les énergies de stock ; leur modularité qui leur permet de s'inscrire dans des systèmes centralisés ou décentralisés ; leurs contraintes propres d'intermittence de l'offre ; leur plus grand besoin en surfaces.

Par construction, les énergies de flux exigent un investissement initial élevé pour construire et installer l'équipement qui fonctionne durant sa durée de vie sans coûts d'approvisionnement, puisqu'il s'agit de capter une énergie présente dans un flux qui se renouvelle. L'économie de tels systèmes repose sur la notion de taux ou de temps de retour qui se décline dans trois dimensions : énergétique, climatique et économique.

Le temps de retour énergétique mesure la durée nécessaire pour que l'énergie utilisée pour construire et installer l'équipement soit couverte par l'énergie produite. Avec la standardisation des méthodes de production, la quantité d'énergie pour produire les équipements éoliens et solaires varie relativement peu et pèse nettement plus que celle, plus variable, requise pour leur transport et leur installation. En revanche, l'énergie produite est très dépendante de la localisation des éoliennes ou des panneaux, de leurs caractéristiques techniques, de leur mode d'exploitation et de leur durée de vie. En moyenne, on estime qu'une éolienne moderne correctement exploitée « rembourse » sa dépense initiale d'énergie en moins d'un an et qu'il faut, suivant les conditions d'ensoleillement et les caractéristiques des panneaux, entre une et deux années pour le photovoltaïque.

Le taux de retour énergétique, souvent connu sous l'acronyme anglais EROI (Energy Return On Investment), a donné lieu à une



littérature assez abondante et parfois polémique. Les premiers travaux sur l'EROI ont montré sa dégradation dans le cadre de l'exploitation pétrolière à mesure que les gisements les plus faciles d'extraction étaient épuisés. Leur application aux renouvelables révèle deux choses. À la différence de ce qui est observé pour les fossiles, l'EROI de l'éolien et surtout du solaire s'améliore avec le temps du fait des progrès technologiques qui permettent de capter une meilleure proportion des flux énergétiques. En termes de niveau, des données assez précises portant sur les États-Unis montre que l'EROI de l'éolien se situe derrière celui de l'hydraulique, à peu près à parité avec le charbon, mais nettement devant le gaz et le photovoltaïque. D'après cette source, le nucléaire et surtout les biocarburants ont des rendements très médiocres<sup>7</sup>. Des observations rigoureusement documentées, mais qui ne peuvent être directement extrapolées à d'autres contextes géographiques.

Le bénéfice climatique du déploiement de l'éolien et du solaire s'obtient en convertissant le bilan énergétique précédent en tonnes de CO<sub>2</sub>. Ces deux sources produisent une énergie totalement décarbonée. Si on ne tient pas compte du cycle de vie, c'est-à-dire des émissions liées à la production et au démantèlement des équipements, leur facteur d'émission est donc nul. Mais il faut de l'acier et du béton pour produire une éolienne, deux matériaux dont la production est fortement émettrice, et beaucoup de métaux et d'énergie pour fabriquer des modules photovoltaïques. Le taux de retour climatique se mesure alors en calculant un facteur d'émission qui tient compte de l'ensemble de ces émissions indirectes.

Sans entrer dans les détails techniques, il faut comprendre la mécanique de base. On émet en moyenne un peu plus de CO<sub>2</sub> pour construire un parc éolien ou solaire que pour une centrale à charbon ou à gaz de capacité équivalente. Mais à conditions moyennes

d'exploitation, l'éolien et le solaire rattrapent très rapidement ce handicap de départ, car leur exploitation est « zéro carbone ». Leur retour climatique sera alors dépendant de la qualité de leur exploitation (facteur de charge et conditions locales d'ensoleillement et de vent) et surtout de leur durée de vie, car le bénéfice climatique tiré des énergies de flux face aux fossiles s'accroît mécaniquement à mesure que s'allonge leur durée d'exploitation. Dans son étude approfondie de 2011 sur les renouvelables, le GIEC concluait dans tous les cas au bénéfice des renouvelables qui, même dans les pires hypothèses, émettent encore bien moins de CO<sub>2</sub> sur leur cycle de vie que les fossiles dans les meilleures conditions<sup>8</sup>. On retrouve cette échelle dans les facteurs d'émission calculés par l'ADEME : pour produire 1 kWh sur l'ensemble du cycle de vie, on émet en moyenne de 10 à 15 g d'équivalent CO<sub>2e</sub> avec de l'éolien<sup>9</sup>, environ 50 g avec du photovoltaïque, contre un peu moins de 500 pour une centrale à gaz, près de 800 pour une centrale au fioul et 1 000 pour une centrale à charbon<sup>10</sup>.

La dimension économique du taux de retour s'obtient à partir des calculs précédents en convertissant les puissances installées (kW), les productions d'énergie (kWh) et les émissions de CO<sub>2</sub> en euros sonnants et trébuchants. Sur le plan microéconomique, l'équation du renouvelable est très simple : il faut investir au démarrage plus d'euros pour espérer ensuite récupérer sa mise en vendant un produit identique à celui issu des procédés fossiles, mais avec un coût d'exploitation des plus réduits en l'absence de coûts d'approvisionnement. Dans le cas d'une autoconsommation, c'est l'économie sur l'achat d'une source non renouvelable qui entre dans l'équation. Les trois paramètres clés sont ainsi le coût du capital immobilisé (équipements + fonciers + frais financiers), l'évolution du prix des sources fossiles et l'efficacité de l'installation.

Bien entendu, si on impute aux émissions du CO<sub>2</sub> une valeur correspondant aux dommages générés par ses rejets dans l'atmosphère, le calcul renchérit les sources fossiles au prorata de leurs contenus en CO<sub>2</sub>. Avec un prix significatif du CO<sub>2</sub>, disons 100 €/t, on n'aurait plus guère besoin de faire ces calculs comparatifs : le solaire et l'éolien sortiraient toujours gagnants !

## **L'EUROPE FINANCE L'AMORÇAGE DU PHOTOVOLTAÏQUE, L'INDUSTRIE CHINOISE EMPOCHE LA MISE**

Mais si l'Europe a joué un rôle déterminant dans le décollage des industries éoliennes et photovoltaïques, elle n'a pas emprunté la voie de la tarification du carbone pour lancer ces nouvelles activités. Elle a utilisé le levier du soutien des prix à la production.

Jusqu'au début des années 2010, les taux de retour économiques sont insuffisants pour déclencher des investissements à grande échelle dans l'éolien et le solaire, même dans les régions ventées ou bien ensoleillées. Seules des politiques publiques de soutien permettent alors de se lancer dans l'aventure. Parmi ces politiques, le mécanisme des prix de rachat garantis (*feed-in tariffs* en anglais) joue un rôle déterminant. Introduits en Allemagne en 1991, bientôt suivie par le Danemark (1993) et l'Espagne (1994), ces dispositifs de soutien sont renforcés au début des années 2000. Ils permettent le décollage de l'éolien et du solaire, une affaire essentiellement européenne jusqu'au début des années 2010, avec plus de 75 % des nouvelles capacités érigées sur le Vieux Continent.

Mais garantir un prix élevé, généralement sur 20 ans, sans contrainte de débouché coûte rapidement très cher à l'État, ou aux consommateurs quand le surcoût leur est refacturé, généralement

via une taxe indirecte (CSPE en France). De surcroît, ce type de mécanisme génère des effets d'aubaine par la distribution de rentes qui protègent les industriels au risque de les affaiblir face à de nouveaux entrants. Durant les années 2010, les États européens révisent leurs politiques de soutien en abaissant parfois drastiquement les *feed-in tariffs* (surtout pour le photovoltaïque) et en systématisant la pratique des appels d'offre assurant un minimum de concurrence entre les développeurs. Cela provoque un coup d'arrêt brutal, mais transitoire, au développement des nouveaux projets, avec des conséquences assez différentes sur les filières industrielles.

Dans le photovoltaïque, le relais est immédiatement pris par la Chine qui démultiplie la taille des usines en accélérant la baisse des coûts. Les producteurs installés ne font pas le poids face à la machine de guerre chinoise. Le japonais Sharp, longtemps leader incontesté du marché, et le californien Sunpower racheté par Total disparaissent du top 10. Les leaders allemands réduisent la voilure ou ferment boutique. La Commission européenne tergiverse et instaure tardivement des droits d'importation qui aggravent plutôt le mal. Pour faire simple, en finançant très cher l'installation de panneaux voltaïques de Hambourg à Lisbonne, puis en changeant brutalement les règles du jeu, les pays européens ont fait le jeu des industriels chinois qui mènent aujourd'hui la danse sur les panneaux standards. Restent les créneaux des couches minces ou des techniques multijonctions où l'innovation technologique, portée en France par un institut public de renommée internationale (l'Institut national de l'énergie solaire, INES), pourrait redistribuer une partie des cartes au profit de producteurs européens.

Dans le domaine éolien, les retombées industrielles ont été très différentes. Les groupes européens leaders, à l'image du danois

Vestas et de l'allemand Enercom, ont plutôt renforcé leurs positions, en répondant à l'élargissement du marché européen par l'implantation locale d'un outil de production compétitif. L'américain General Electric, fortement implanté en France, a subi de lourdes déconvenues dans les centrales thermiques et les services financiers, mais reste dans la course en matière d'éoliennes, en fournissant en particulier les parcs offshore d'engins de très grande dimension. Mais l'accélération du programme chinois depuis 2015 et l'entrée des États-Unis dans le domaine offshore risquent de modifier le jeu concurrentiel dans les années à venir.

## **PRODUIRE LE KWH ET LE LIVRER À L'UTILISATEUR (AU BON MOMENT !)**

Historique, la baisse des coûts de production de l'éolien et du photovoltaïque va se traduire par une injection croissante dans des réseaux énergétiques qui n'ont pas été conçus pour cela. Sitôt qu'elle atteint un certain volume, cette injection génère des difficultés en raison des contraintes de l'intermittence propres à l'éolien et au photovoltaïque. Par exemple, les pics de production du solaire en Allemagne provoquent, quand il n'y a pas de demande en face, un déséquilibre menaçant la stabilité du réseau. C'est alors qu'apparaissent sur le marché de gros des prix négatifs : les fournisseurs de courant doivent payer des clients pour écouler cette marchandise indésirable. Ce sont généralement les Polonais qui profitent de l'aubaine, car leur système électrique est plus flexible.

Pour tenir compte des contraintes propres à l'intermittence, l'AIE calcule désormais des coûts de production des différentes sources électriques en valorisant leurs plus ou moins grandes capacités à s'intégrer dans le réseau<sup>11</sup>. Cela a pour résultat d'accroître le coût

du solaire et de l'éolien relativement aux fossiles. Au sein de l'Union européenne, le coût du kWh photovoltaïque est ainsi renchéri d'environ 15 % relativement à celui des centrales à charbon ou à gaz, et celui de l'éolien offshore de près de 20 %. Si les réseaux existants ne s'adaptent pas, les coûts de l'intermittence deviendront prohibitifs. La vitesse du développement des renouvelables se joue désormais plus dans les coûts de transport, de distribution et de stockage de l'électricité qu'à la production.

D'après les calculs de l'AIE, les investissements dans les réseaux (transport, distribution et stockage) représentent entre 35 et 40 % des investissements du secteur électrique. Avec le déploiement des renouvelables et l'augmentation des usages de l'électricité, cette proportion va augmenter. Il sera de moins en moins coûteux d'investir pour produire le kWh produit, mais il faudra plus d'investissement, matériel et immatériel, pour l'acheminer jusqu'à l'utilisateur final.

L'Allemagne qui a pris une longueur d'avance en matière de développement des renouvelables (et a de plus choisi d'accélérer sa sortie du nucléaire) fournit un cas d'école instructif. Pour transférer la production des parcs éoliens majoritairement situés au nord du pays afin d'approvisionner le sud, il est prévu d'y construire 4 550 km de lignes à haute tension. Leur coût est d'autant plus élevé que le gouvernement s'est engagé à les enterrer pour réduire les oppositions locales. À cet investissement s'ajoutent ceux dans la distribution finale. D'après les opposants, une partie de ces investissements pourrait cependant être évitée si on reconfigurait plus drastiquement l'architecture du réseau en y injectant plus d'intelligence pour optimiser les mailles locales et limiter les transports de l'électricité sur une longue distance.

La modularité des énergies renouvelables, incomparable pour le photovoltaïque, permet de disséminer les sources en rapprochant la production de la consommation. C'est un atout face aux fossiles et au nucléaire. Les sources fossiles peuvent techniquement être déployées de façon décentralisée, via les groupes électrogènes, mais à des coûts élevés et avec des dommages environnementaux difficiles à contrer (usage du diesel). La source nucléaire ne doit pas être disséminée. C'est la raison pour laquelle les réseaux de transport et de distribution d'électricité ont une architecture descendante, de type centralisé, pas du tout configurée pour fonctionner avec des quantités croissantes de renouvelable. C'est particulièrement vrai en France où ils ont été conçus pour dispatcher une production issue de 58 réacteurs nucléaires encore capables de fournir les trois quarts de l'électricité du pays en 2019.

La reconfiguration des réseaux a une dimension technologique importante. Pour imaginer les réseaux électriques de demain, il faut anticiper trois mutations : la montée en régime des sources renouvelables pouvant s'intégrer dans des systèmes centralisés ou décentralisés, l'élargissement des capacités de stockage de l'électricité et l'explosion des capacités de traitement de l'information. Le stockage et le digital sont les deux leviers qui permettront de faire face à l'intermittence. Mais pour les actionner, il faut repenser l'économie des réseaux électriques.

## **LA NOUVELLE ÉCONOMIE DES RÉSEAUX**

La technique mature permettant de stocker l'électricité à grande échelle consiste à renforcer la capacité de production hydraulique : en période de production excédentaire, on utilise le surplus d'électricité pour acheminer l'eau vers des réservoirs supérieurs,

pour la renvoyer dans la turbine afin de fabriquer plus de courant en période de déficit. La technique de pompage-turbinage permet de gérer les irrégularités intersaisonnières. Les batteries stockent directement l'électricité. Leur usage à grande échelle a jusqu'à présent été bridé par leur coût dissuasif. La baisse du coût de fabrication des batteries est en train de changer la donne. Elle permet d'embarquer des puissances de plus en plus importantes, ce qui change les perspectives de motorisation des véhicules ([chapitre 8](#)). Elle permet aussi de répondre aux contraintes d'intermittence, notamment journalières. Un nombre croissant de projets solaires intègre désormais des capacités de stockage par batterie. L'hydrogène qu'on peut fabriquer à partir de surplus d'offre d'électricité renouvelable constitue un troisième vecteur potentiel de stockage de l'électricité. Il est susceptible d'introduire à terme une flexibilité additionnelle reposant sur la complémentarité entre le réseau électrique et celui de gaz.

Sous l'angle de la demande, la flexibilité consiste à ajuster la consommation en fonction des informations sur l'offre et la demande disponibles sur le marché. Le prix de l'électricité sur les marchés de gros donne un signal sur l'état global de l'offre et de la demande, utile pour les industriels qui s'y approvisionnent, mais qui ne touche pas la grande majorité des acheteurs d'électricité. Il ne donne pas d'information sur la distribution de l'offre et de la demande dans les réseaux. Une information stratégique à laquelle ont accès les gestionnaires de ces réseaux, généralement soumis à de strictes régulations. Cette situation est en train de changer avec l'irruption du digital dont les compteurs « intelligents » ne sont que les prémices. Ces compteurs apportent à leurs utilisateurs une information très fine sur leurs profils de consommation et la façon dont on peut la lisser. En raccordant différents compteurs, on peut consolider ces



informations dans une maille locale ou régionale. Si ces consommateurs deviennent aussi producteurs, grâce à la modularité des renouvelables, on a alors constitué un « réseau intelligent » (*smart grid*). Ce réseau donne de multiples possibilités d'optimiser l'offre et la demande grâce au traitement de l'information, avec possiblement le renfort de l'intelligence artificielle. Si on fait abstraction des contraintes réglementaires, l'intérêt de basculer vers des systèmes décentralisés, interconnectés ou non, dépendra beaucoup des modèles économiques et notamment de la tarification qui est un véritable casse-tête pour les gouvernements.

La tarification de l'électricité a fait l'objet d'une abondante littérature académique. L'idée principale à retenir est que pour gérer efficacement un système électrique, il convient d'appliquer une règle simple à la production : la tarification au coût marginal. Cette règle s'applique aussi bien si le système est géré par un monopole qui intègre la production et la distribution (par exemple EDF en France jusque dans les années 1980) que s'il est organisé avec des mécanismes de marché facilitant la concurrence. Le problème est que la tarification au coût marginal ne pourra plus s'appliquer avec le développement des renouvelables. Elle conduirait à l'autodestruction du système, car le coût marginal des énergies renouvelables étant nul, le prix convergerait à terme vers zéro.

Une réforme drastique consisterait à basculer vers une tarification à la puissance, de façon similaire à ce qui a été fait avec la téléphonie mobile. Il y a encore peu, nos factures téléphoniques étaient établies en fonction du nombre de communications. Aujourd'hui, la majorité des utilisateurs règlent un forfait qui leur permet d'accéder à un nombre illimité de communications (avec encore quelques limites pour l'international). Un tel système serait en théorie répliquable pour l'électricité : il conduirait à facturer la

puissance installée, le maximum de kW que peut recevoir votre compteur, et non plus le nombre de kWh appelés. Une telle tarification permettrait de rémunérer le producteur. Elle aurait le défaut de ne pas inciter le consommateur à économiser l'énergie.

Le dispositif des appels d'offre avec des contrats d'achat à prix fixe (généralement sur 20 ans), comme la rémunération de la capacité ou de l'effacement sur les marchés électriques, permet d'hybrider la tarification. Ces réformes vont s'accélérer avec la bascule vers l'éolien et le solaire, et la nécessité de coupler des systèmes centralisés et décentralisés. Leurs modalités auront beaucoup d'impact sur les questions d'équité. Suivant les modèles retenus, la bascule vers les renouvelables peut en effet accroître ou réduire les inégalités d'accès à l'énergie.

## **QUAND LE RENOUVELABLE DEVIENT FACTEUR D'INÉGALITÉ**

Contrairement à une image d'Épinal complaisamment véhiculée, les énergies de flux ne sont pas intrinsèquement « inclusives ». Tout dépend des choix économiques et sociaux qui accompagnent leur déploiement.

Lors des phases de démarrage, la technique du prix garanti financé par une taxe reportant la charge sur l'ensemble des consommateurs d'électricité a été retenue en France et en Allemagne. Le système a été très efficace pour amorcer la pompe du renouvelable (surtout en Allemagne), mais il a rapidement renchéri l'électricité au détail du fait de la taxe (CSPE en France, EEG en Allemagne). Ce renchérissement est intervenu au moment même où les quantités additionnelles d'électricité injectées par les renouvelables ont accru la surcapacité électrique sur le marché et provoqué une baisse des prix de gros. Une situation pas facile à

expliquer au citoyen qui voit le prix augmenter sur sa facture, alors que les grandes compagnies électriques se plaignent de la baisse des cours !

Mais tous les citoyens sont loin d'avoir été affectés de façon uniforme. L'ensemble des ménages a réglé de façon proportionnelle la taxe. La minorité qui a pu installer des panneaux photovoltaïques sur son toit a bénéficié du système avec la possibilité de revendre son électricité pendant 20 ans à un tarif garanti. Les ménages qui ont les moyens de couvrir leurs toits de panneaux photovoltaïques à Hambourg ou à Menton appartiennent dans leur grande majorité aux catégories à haut revenu. Leur toiture a été largement financée par les taxes réglées par les locataires des logements sociaux de Saint-Denis ou de Neukölln (quartier de Berlin). Dans une étude très fouillée, Grösche et Schröder ont montré le caractère anti-distributif des *feed-in tariffs* allemands<sup>12</sup>.

Ce type de distorsion va être amené à disparaître avec la réduction des soutiens publics du photovoltaïque à la production. Mais la question du mode de tarification rejaillit en aval du fait des nouveaux modes d'utilisation possibles du réseau. L'introduction de sources photovoltaïques décentralisées couplée à des moyens de stockage permet d'autoproduire une proportion croissante de son électricité. Demain, l'électrification du parc de véhicules électriques va accroître la capacité de stockage décentralisée : la batterie des véhicules pourra également servir à stocker et déstocker de l'électricité pour les usages du logement. Le mode d'utilisation du réseau change alors du tout au tout.

Dans le système centralisé classique, les ménages, plus généralement la mosaïque des petits consommateurs, se fournissent intégralement sur le réseau. La dissémination de sources décentralisées, couplée à l'accroissement des capacités de

traitement de l'information, peut radicalement modifier ce mode d'usage. Le réseau national devient alors une sorte d'appoint destiné à gérer les seuls excédents ou déficits éventuels. Dans une telle situation, si la tarification d'accès au réseau reste proportionnelle au nombre de kWh transitant par le réseau, on pratique à nouveau de l'anti-redistribution, comme le montre une étude de la Chaire Économie du Climat portant sur la France<sup>13</sup>. Les ménages continuant d'acheter 100 % de leur électricité sur le réseau sont mis à contribution au profit des heureux détenteurs de panneaux photovoltaïques qui produisent une part croissante de leurs besoins sans passer par le réseau.

Derrière la question du mode de tarification du réseau se profile celle de l'existence même de ce réseau et de la pérennité de la péréquation tarifaire assurant une égalité des conditions d'accès à l'ensemble de ses utilisateurs. En France, ce réseau, parfaite illustration du service public « à la française », fait l'objet d'un large consensus citoyen. Ce consensus sera-t-il suffisant pour protéger cette architecture unificatrice contre les forces centrifuges déclenchées par l'alliance des technologies digitales et des sources d'énergie décentralisées dans les réseaux de demain ?

## **ACCÉDER À L'ÉLECTRICITÉ EN SAUTANT L'ÉTAPE DES FOSSILES ?**

La bascule vers les renouvelables peut également s'inscrire dans des schémas inclusifs, facilitant l'accès à l'énergie pour tous et redistribuant des ressources économiques au profit de territoires coupés des métropoles et de leurs concentrations de richesses. Une application majeure concerne la généralisation de l'accès à l'énergie dans les pays en retard de développement.

« Le socialisme, c'est les Soviétiques plus l'électricité », suivant la formule célèbre de Lénine prononcée en 1918, peu après la prise du pouvoir par le parti. Un siècle plus tard, près d'1 milliard de personnes n'ont aucun accès à cette énergie : 13 % de la population mondiale contre 30 % en 1990. Dans les économies de marché comme dans celles régulées par le plan, le développement économique s'est partout accompagné d'une généralisation de l'accès à l'électricité réalisée grâce à des réseaux, financés par des fonds publics, partant de centres de production concentrés et descendant toujours plus loin vers les populations reculées. Dans un tel schéma, le coût d'investissement pour étendre les dernières mailles du réseau est bien plus élevé que celui initialement requis pour alimenter les centres urbains.

L'Afrique au sud du Sahara (à l'exception de l'Afrique du Sud) reste une zone où moins d'un habitant sur deux a accès à l'électricité. En 2017, trois habitants sur quatre y ont accès dans les villes, pour seulement un villageois sur quatre. Sont en cause le retard de développement, bien sûr, mais aussi les défaillances des organisations verticales en charge de la production et de la distribution de l'électricité via les réseaux historiques. C'est pourquoi l'élargissement de l'accès à l'électricité semble emprunter une voie qui s'écarte des modèles historiquement empruntés par les pays industrialisés (et plus récemment par la Chine et quelques autres).

Jusqu'à un passé récent, l'accès à l'électricité sans passer par le réseau (*off-grid*) était considéré comme un phénomène marginal, réservé aux cas exceptionnels : les satellites, les refuges de montagne, les stations scientifiques de l'Antarctique, les situations insulaires, etc. La situation a fondamentalement changé dans les années 2010 avec le développement du solaire distribué de façon décentralisée. Il touche désormais près de 5 % de la population

africaine. Au Kenya et en Tanzanie, la moitié de la population vivant à l'écart du réseau classique a désormais un accès *off-grid* à l'électricité. En Ouganda et en Éthiopie, on est proche du quart de la population. Partie de l'Afrique anglophone, la dynamique se diffuse désormais rapidement en Afrique de l'Ouest.

L'amorçage du *off-grid* repose sur un kit comprenant trois objets clés : un téléphone mobile, un chargeur permettant de l'utiliser, quelques ampoules ou LED pour s'éclairer. Ces trois éléments permettent d'apporter une communication avec l'extérieur, mais aussi un service de paiement (téléphone), une certaine continuité (recharge), un peu de lumière dans la nuit africaine dont les photos satellite révèlent l'obscurité. Pour beaucoup d'Africains, c'est pratiquement un kit de survie.

La baisse du coût du photovoltaïque a rendu possible l'émergence d'un modèle économique qui combine deux innovations permettant d'accélérer la diffusion du kit de base : une tarification à l'usage (« *pay as you go* ») qui permet de réduire l'investissement initial en le faisant porter par des factures mensuelles ; un paiement effectué via la téléphonie mobile, avec un mécanisme de blocage en cas de non-règlement de la mensualité.

Au kit de base viennent rapidement s'ajouter d'autres objets, une télévision en premier lieu, et d'autres appareils équipant la maison. Il faut dès lors une puissance installée supérieure, via un jeu de panneaux de plus grande dimension ainsi que plus de capacité de stockage. On passe d'un usage individuel à un usage familial qui apporte potentiellement d'autres aménités favorables au développement (études, travail domestique, etc.) et peut rester dans le même modèle économique.

En raccordant entre elles ces unités familiales, on passe à une maille locale qui peut multiplier les usages, notamment pour

répondre à d'autres besoins : accès à l'eau via des motopompes, irrigation, cuisson, artisanat, etc. On a alors constitué un réseau décentralisé (*mini-grid*) qui exige plus de capital initial, mais surtout une organisation collective pour gérer les flux d'électricité entre les différents maillons du système.

Le développement de l'accès *off-grid* à l'électricité a été porté jusqu'en 2016 par la diffusion de kits à utilisation individuelle moins coûteux. Depuis 2016, le marché des kits simples tend à basculer vers celui des équipements du logement et les *mini-grid* qui offrent un accès à des services bien supérieurs. Dans un rapport commun sur les objectifs de développement durable, les agences multilatérales notent l'accélération de l'accès à l'énergie propulsé par la dissémination du photovoltaïque en Afrique subsaharienne et en Asie du Sud. Elles déplorent simultanément que des pas en avant comparables ne soient pas réalisés pour améliorer les systèmes de cuisson et dans l'utilisation des renouvelables pour le transport et la production de chaleur<sup>14</sup>.

À court terme, la distribution décentralisée du photovoltaïque a ouvert l'accès à l'électricité à plusieurs dizaines de millions d'Africains, majoritairement localisés en milieu rural, qui en étaient privés. C'est en soi un résultat majeur. Soutenu par un écosystème d'entreprises locales innovantes, cette diffusion s'effectue à un rythme bien plus rapide que celle des générateurs diesel, plus polluants et devenus bien plus coûteux, qui devraient être repoussés vers les marges du système.

Du fait de l'urbanisation, les besoins des villes africaines en électricité croissent très rapidement. La distribution décentralisée ne peut y être qu'un appoint. Il faut également investir dans des réseaux historiques généralement assez vétustes et y adjoindre des capacités de production centralisées provenant soit de centrales

thermiques, généralement à charbon, soit de sources hydrauliques ou photovoltaïques de grande capacité. Ces modèles centralisés peinent à se mettre en mouvement, si bien que l'écart entre les taux d'électrification des villes et des campagnes pourrait se réduire rapidement, voire s'inverser.

Il est difficile d'imaginer où conduisent ces modes de développement aux ressorts nouveaux. Tout porte à croire qu'ils permettront de généraliser l'accès à l'électricité en court-circuitant une grande partie des étapes fossiles historiquement suivies par les pays développés. Ceci devrait permettre à l'Afrique subsaharienne d'atteindre un pic d'émission de CO<sub>2</sub> lié à l'électrification plus rapidement et à un niveau bien plus bas que dans la majorité des expériences historiques d'électrification (certains pays disposant de ressources hydrauliques abondantes ont également court-circuité cette étape fossile). Mais pour l'heure, il n'y a pas de signal permettant d'anticiper un mécanisme équivalent pour le transport et la production de chaleur.

Peut-être l'architecture des réseaux qui se met en place, avec le puissant élan des systèmes décentralisés, préfigure-t-elle également celle des réseaux intelligents de demain : non plus une arborescence descendante, mais une constellation de liaisons complexes entre mailles communicantes, avec des systèmes d'information optimisant à tous niveaux les mouvements d'électrons.

## **GÉOPOLITIQUE DES RENOUVELABLES : LES RÉSEAUX ET LES MÉTAUX**

Traditionnellement, la géopolitique de l'énergie est mue par deux ressorts principaux : contrôler les sources d'énergie et maîtriser la chaîne de transport et distribution. Depuis deux siècles, Elle vise à



contrôler l'accès aux mines et aux puits les mieux situés, à sécuriser les voies maritimes et terrestres de transport, à intégrer production et distribution, sans évoquer le jeu des cartels et ententes pour agir sur les conditions de marché. Avec la montée en régime de l'éolien et du photovoltaïque, la géopolitique de l'énergie va se métamorphoser. Ses deux ressorts sont le contrôle des réseaux et la sécurisation des métaux utilisés pour fabriquer les équipements.

Avec le déploiement des modèles décentralisés, la masse d'information à traiter croît exponentiellement, car la frontière classique entre un nombre limité de centres de production concentrés et des utilisateurs finaux s'estompe. Chaque consommateur devient producteur à certaines heures, vendeur net ou acheteur net suivant les cas. La capacité et la rapidité du traitement de l'information deviennent dès lors une variable stratégique. C'est pourquoi les marchés de la distribution électrique intéressent tant les géants du monde digital, avec à la clé un basculement des pouvoirs de marché d'amont (souvent des monopoles publics historiques) en aval. Sous l'angle politique, ceci pose un problème réglementaire assez aigu : les régulateurs qui ont généralement des accès exclusifs à l'information ne disposent pas de capacités de calcul et de traitement de l'information équivalentes à celles des grandes entreprises du numérique. Derrière l'émergence des réseaux intelligents de distribution de demain, la compétition pour le contrôle de l'information risque de faire reculer les prérogatives de l'intérêt général au profit des maîtres du big data.

Le transport du courant à longue distance est une opération coûteuse en capital et qui bute sur les pertes en ligne à mesure que la distance s'allonge. Les lignes à ultra-haute tension qui utilisent le courant continu permettent de réduire drastiquement ces pertes. La compagnie d'État chinoise en charge du réseau est de loin le plus

grand opérateur mondial de transport d'électricité. Début 2019, elle a mis en service une ligne ultra-haute tension en courant continu capable de transmettre 12 GW sur plus de 3 000 km entre le Nord-Ouest et l'Est de la Chine. La Chine ambitionne d'utiliser son avance technologique sur le transport de l'électricité au plan international. Sous l'égide du GEIDCO, une organisation internationale basée à Pékin promouvant l'interconnexion des systèmes électriques dans le monde <sup>15</sup>, la Chine investit massivement à l'étranger dans les futures autoroutes de l'électricité qui s'inscrivent dans la logique de la « nouvelle route de la soie » (Belt and Road). Ces autoroutes pourraient permettre demain à la Chine d'exporter ses excédents d'électricité d'origine photovoltaïque, très compétitive, vers l'Europe. Le tracé de ces autoroutes devrait probablement rapidement bifurquer vers l'Afrique où la Chine est le premier investisseur dans le transport de l'électricité et les fermes photovoltaïques de grande capacité. D'importantes voies de transport pourraient alors rattacher le Sahara et le Proche-Orient, deux gisements solaires majeurs, au reste du continent africain, à l'Asie centrale et à l'Europe de l'Ouest. Dans la géopolitique d'hier, la sécurisation du détroit d'Ortmutz et le tracé des gazoducs et des oléoducs étaient au cœur des enjeux stratégiques. Dans celle de demain, la maîtrise des autoroutes de l'électricité et de leurs points de bifurcation pourrait devenir le nerf de la guerre. La Chine s'y prépare résolument.

Autre domaine où s'affirme la présence chinoise : la sécurisation de l'amont. Dans son ouvrage *L'âge des low tech*, Philippe Bihouix nous rappelle que le déploiement des renouvelables requiert beaucoup de métaux. Atteindre les objectifs climatiques sans épuiser les réserves de certains métaux devient un nouveau défi, impossible à tenir d'après l'auteur si on ne prend pas l'option des low tech <sup>16</sup>. Dans *La guerre des métaux rares. La face cachée de la*

*transition énergétique et numérique*, Guillaume Pitron lève le voile sur les conditions d'extraction de nombreux métaux rares qui sont fortement émettrices de CO<sub>2</sub> et d'autres polluants, et s'opèrent souvent dans des conditions humaines déplorables. L'auteur oppose également la vision stratégique de la Chine qui sécurise ses accès, sans hésiter comme dans le cas des terres rares en 2011 à opérer un embargo à l'exportation, aux réactions défensives d'une Europe qui semble promise à réagir, voire à subir, plutôt qu'à anticiper.

Ces deux ouvrages ont joué en France un rôle utile de lanceurs d'alertes. La géopolitique de l'énergie s'est construite au <sup>xx<sup>e</sup></sup> siècle sur la carte des raretés relatives des stocks d'énergie fossile en terre. La bascule vers les renouvelables la déporte vers les mines d'où sont extraits les métaux nécessaires pour fabriquer les équipements captant les énergies de flux. Comme le montrent les études de la Banque mondiale<sup>17</sup> et d'une équipe de chercheurs de l'IFPEN et de l'IRIS<sup>18</sup>, les métaux rares ne sont pas les seuls en cause : couvrir les besoins de cuivre, d'aluminium, de fer ou de plomb sera aussi stratégique pour la bascule vers les renouvelables que de répondre à la demande de manganèse, de lithium, d'argent ou des métaux extraits des terres rares. La Banque mondiale y voit dans certains cas une opportunité, comme dans le cas de la Guinée qui détient les plus grandes réserves de bauxite au monde mais ne dispose d'aucune unité de transformation en aluminium. Les tensions prévisibles sur le cuivre pourraient être fortement réduites si on parvient à accroître le recyclage. Quant aux tensions sur les petits métaux, il s'agit moins d'un problème de rareté géologique que de mouvements géopolitiques. L'interruption des exportations de terres rares de la Chine en 2011 ciblait le Japon à un moment où les manœuvres d'intimidation se multipliaient en mer de Chine. Quelques mois ont suffi pour mettre en route des capacités de

production en Australie et aux États-Unis, et reprendre les approvisionnements à des prix plus raisonnables. Comme pour le pétrole, les manœuvres stratégiques se traduisent par des hausses de prix qui déclenchent des investissements et repoussent les risques de pénurie. C'est plus le coût des matières premières, que leur disponibilité, qui pourrait freiner le déploiement des renouvelables. L'industrie du photovoltaïque a déjà connu un tel ralentissement au début des années 2000, provoqué par l'envolée du prix du silicium utilisé pour fabriquer les téléphones mobiles. La rapidité de la réaction des producteurs chinois, les premiers à élargir la capacité de production de silicium, a alors largement contribué à établir leur suprématie sur l'industrie photovoltaïque mondiale.

## **ACCÉLÉRATION DES RENOUVELABLES ET REPRISE DES ÉMISSIONS DE CO<sub>2</sub>**

L'accélération du déploiement des renouvelables à partir du milieu de la décennie 2010 ne s'est pas traduite par un ralentissement des émissions mondiales de CO<sub>2</sub>. C'est même le contraire qui a été observé en 2017 et 2018 avec la reprise de ces émissions. Une coïncidence fâcheuse qui a pu laisser fleurir certains commentaires sur l'inefficacité des politiques stimulant les énergies renouvelables pour faire reculer les émissions de CO<sub>2</sub>.

L'observation des faits conduit à un constat différent. C'est la hausse de la consommation d'énergie dans le monde qui a provoqué le rebond des émissions de 2017 et 2018. Cette hausse a eu deux moteurs principaux : la reprise de l'activité mondiale et l'effet décalé du contrechoc pétrolier de 2015 et 2016. Ceci révèle qu'en dépit des transformations du système énergétique, le monde ne s'est pas affranchi de la logique de l'empilement des sources

prévalant depuis deux siècles. Malgré l'accélération de leur déploiement, les sources éoliennes et photovoltaïques s'ajoutent à celles préexistantes sans s'y substituer sitôt que la conjoncture va mieux et que le prix des énergies fossiles est bas. Mais ce n'est qu'une question de temps. Au-delà de l'horizon conjoncturel, la bascule vers les renouvelables est en train de changer la donne.

Cela s'observe déjà dans les pays développés. Dans une étude empirique portant sur la période 2005-2015, Corinne Le Quéré et ses coauteurs cherchent à identifier les facteurs à l'origine de la baisse des émissions de CO<sub>2</sub> de 12 de ces pays ayant dépassé le pic d'émissions<sup>19</sup>. Deux facteurs ressortent : la pénétration des renouvelables nettement plus forte dans ces pays que dans le groupe témoin ; la modération de la consommation d'énergie sans doute plus attribuable à la récession de 2008-2009 qu'à la mise en place de politiques d'efficacité énergétique. En dehors des États-Unis, la bascule du charbon vers le gaz n'a joué qu'un rôle secondaire dans la décarbonation des pays étudiés. Les politiques de soutien au renouvelable ont donc joué un rôle catalyseur.

Dans les années qui viennent, la pénétration des sources renouvelables va créer des conditions similaires dans les pays émergents qui pourraient atteindre leur pic d'émission plus tôt que ne le laissent présager les tendances récentes et à des niveaux de rejet de CO<sub>2</sub> par habitant plus bas que pour les pays d'industrialisation ancienne. Comme pour les pays développés, une grande inconnue est le rythme de substitution possible des fossiles par les renouvelables dans le transport et la production de chaleur. Ces pays ont l'avantage d'être moins contraints par les inerties techniques et comportementales rencontrées dans les pays d'industrialisation plus ancienne. Une autre inconnue est le potentiel

d'économie d'énergie pouvant être atteint grâce à l'efficacité de ses usages.

Comme on l'a vu plus en détail en Afrique subsaharienne, dans les pays en retard de développement, la bascule vers les renouvelables porte la promesse de nouveaux modèles d'accès à l'énergie court-circuitant les étapes fossiles. Cela est susceptible de hâter la généralisation d'un accès sécurisé à une énergie propre pour le plus grand nombre, compatible avec l'atteinte d'un pic d'émission de CO<sub>2</sub> nettement plus faible.

Mais il n'y a aucun déterminisme en la matière, ni dans les pays riches ni dans les pays pauvres. Les choix économiques et sociaux pour accélérer la transition bas carbone ne sont pas faciles à faire. On ne sort pas de deux siècles d'addiction croissante aux énergies fossiles sans s'opposer à de sérieux obstacles. Notamment parce que les fossiles pourraient bien faire de la résistance !

## CHAPITRE 7

# LES FOSSILES FONT DE LA RÉSISTANCE

Dans son ouvrage *The Green Paradox*<sup>1</sup>, l'économiste Hans-Werner Sinn met en garde contre un risque lié aux politiques climatiques : si les détenteurs de charbon, de pétrole ou de gaz d'origine fossile anticipent qu'ils auront à faire face dans le futur à des régulations contraignantes, ils peuvent être tentés d'accélérer le pompage immédiat dans leurs réserves. S'il est interdit ou très coûteux, demain, d'extraire du charbon, de raffiner du pétrole ou de brûler du gaz d'origine fossile, dépêchons-nous de le faire tant que cela est encore possible !

À la suite de l'accord de Paris sur le climat, les détenteurs d'énergie fossile se trouvent dans une situation comparable à celle évoquée par Sinn. L'accord fixe la cible de neutralité carbone et laisse le soin aux différents pays de mettre en place les moyens de l'atteindre. Comme il n'y a pas consensus sur ces moyens, les contraintes immédiates sur les producteurs restent ténues malgré les appels au désinvestissement de leurs activités polluantes. Les fossiles font de la résistance en s'appuyant sur des rentes économiques considérables réinvesties dans la recherche de nouveaux gisements.

Nous démarrons notre investigation par le charbon, le fossile le plus émetteur de CO<sub>2</sub>. Ses réserves exploitables<sup>2</sup> sont considérables. La sortie amorcée du charbon au sein de l'Union européenne et l'incapacité de Donald Trump à endiguer le recul de sa consommation aux États-Unis vont dans le bon sens. Mais les deux géants asiatiques, Chine et Inde, s'engagent massivement dans les énergies renouvelables, sans renoncer au charbon. Simultanément, de nouveaux pays entrent dans le club des utilisateurs du minerai pour fabriquer leur électricité. Du fait de son très faible coût, et malgré les oppositions cristallisées par ses dommages sanitaires, le charbon est une source d'énergie dont on a bien du mal à se défaire.

Le prix du pétrole continue de jouer un rôle majeur dans l'économie mondiale. Il détermine le montant de la rente que se partagent les pays producteurs, les compagnies pétrolières et les États qui prélèvent des taxes lors de son utilisation finale. Le pétrole est encore la première source d'énergie utilisée dans le monde, mais le vent de l'histoire pourrait tourner avec la fin en vue de l'hégémonie du moteur à combustion interne. Une transformation majeure qui va s'étaler sur quelques décennies. Le gaz d'origine fossile est une ressource abondante qui peut se substituer au pétrole dans un grand nombre de cas. Son usage a le vent en poupe. Moins polluant que le pétrole, et moins émetteur de CO<sub>2</sub>, le gaz d'origine fossile est souvent présenté comme une « énergie de transition ». Aussi, le rééquilibrage des portefeuilles du pétrole vers le gaz est un axe stratégique des grandes compagnies. Nous embarquerons dans l'« express côtier » pour découvrir l'exploitation gazière le long des côtes norvégiennes jusqu'en mer de Barents. La boulimie de gaz d'origine fossile n'est pas compatible avec la cible de neutralité carbone.



La poursuite des investissements dans le fossile alimente la constitution d'un stock de capital à très longue espérance de vie qu'il faudra bientôt abandonner. Liquidier cette masse d'« actifs échoués » va représenter un coût considérable pour réduire dans les temps les émissions de CO<sub>2</sub>. Nous concluons le chapitre en soulignant combien ce coût de la transition énergétique est mal anticipé.

## **LE CHARBON, ÉNERGIE DU PASSÉ ?**

Au Royaume-Uni ou en France, le charbon est associé à l'énergie du XIX<sup>e</sup> siècle. Les romans de Zola ou de Dickens nous plongent au cœur des drames sociaux déclenchés par son introduction. L'histoire du minerai est balisée de grands moments : le fog de l'hiver 1956 provoquant le décès prématuré de 4 000 Londoniens à cause des poêles à charbon « aussi sacro-saints pour les Anglais d'avant 1950 que ne l'est l'automobile pour un Américain contemporain<sup>3</sup> » ; la reconversion dans la douleur des houillères du Nord de la France ; la bataille de Margaret Thatcher contre le syndicat des mineurs ; le combat de Jean Jaurès pour les gueules noires de Carmaux...

Aujourd'hui, le charbon ne joue plus qu'un rôle marginal dans la production électrique des deux pays. Il reste indispensable dans la sidérurgie. Mais les maîtres de forges, hier aux commandes de cette industrie, ont cédé la place à des capitalistes venus de pays émergents, plus aptes à restructurer et réduire la voilure. Aux pays de Dickens et de Zola, le recul du charbon a démarré il y a plus d'un demi-siècle. Son histoire va bientôt se refermer, le temps d'arrêter ou de reconvertir les derniers hauts fourneaux. Cette trajectoire est en ligne avec les scénarios visant à endiguer le réchauffement

global. C'est une erreur monumentale de croire que le mouvement est facilement extrapolable au reste du monde.

Les réserves économiquement exploitables de charbon sont abondantes : quelque 134 années de production au rythme de l'extraction de 2017. Ce ratio varie selon les pays. Les États-Unis et la Russie disposent de respectivement 357 et 391 années de production. L'Inde qui a accru le plus rapidement sa consommation entre 2010 et 2017 a encore 136 années devant elle. La Chine a déjà beaucoup sollicité ses réserves. Il ne lui reste plus que 39 années de production.

La réserve mondiale de charbon représente un potentiel d'émission de CO<sub>2</sub> de l'ordre de 2 174 Gt. Son extraction totale équivaldrait à 60 années d'émission de CO<sub>2</sub> (hors changements d'usage des terres) au rythme de 2017. En n'exploitant que le tiers des réserves mondiales au cours des prochaines décennies, on consommerait l'intégralité du budget mondial donnant deux chances sur trois de limiter le réchauffement à 2 °C. Les scénarios visant la neutralité carbone reposent donc sur un retrait accéléré du charbon du mix énergétique mondial. McGlade et Ekins<sup>4</sup> estiment qu'il faudrait laisser plus des quatre cinquièmes en terre, même dans un scénario de déploiement optimiste de capture et stockage du CO<sub>2</sub>. Ce qui est souhaitable est-il pour autant réalisable ?

Sur les 7,5 milliards de tonnes extraites des mines de charbon en 2017, deux tiers ont servi à la production d'électricité, le reste a été dirigé vers l'industrie, principalement pour fabriquer de l'acier ou transformer des métaux. Les scénarios visant la neutralité carbone en 2050 font disparaître le minerai de la production électrique en quelques décennies. Son usage dans l'industrie est également réduit à peau de chagrin sans que soit généralement précisée la méthode

pour y parvenir. Ce double objectif ne se discute pas sous l'angle climatique. Il est bien plus difficile à atteindre qu'il n'y paraît.

Un peu moins de 40 % de l'électricité mondiale est produite à partir du charbon. Une proportion qui n'a pas significativement bougé depuis quarante ans. L'objectif climatique exige de ramener en quelques décennies ce 40 % à une fraction négligeable.

## **LE LIGNITE SI BON MARCHÉ !**

Le premier obstacle à la réduction du poids du charbon est sa trop grande disponibilité. Si le Royaume-Uni et la France ont épuisé les principaux filons facilement exploitables sur leur territoire, ce n'est pas le cas de l'Allemagne, premier producteur mondial de lignite. Au bas de l'échelle en termes de qualité, le lignite est le charbon le plus émetteur de CO<sub>2</sub> au kWh produit. Mais c'est aussi l'un des plus faciles à extraire, car il est présent en surface. Son exploitation à ciel ouvert permet de produire l'un des kWh les moins chers du pays, dans des centrales à haute efficacité énergétique, souvent programmées pour fonctionner encore plusieurs décennies.

Les mines allemandes les plus importantes sont exploitées par une filiale de l'électricien RWE en Rhénanie-du-Nord-Westphalie. Les autorités régionales, toutes tendances politiques confondues, résistent à la fermeture des mines. L'économie est appelée au secours. La protection des 21 000 emplois directs de mineurs (130 000 au moment de la réunification) a une portée symbolique forte dans une région qui a été le berceau industriel du pays. Derrière les emplois directs, il y a tous ceux qui pourraient être menacés par la remontée du prix de l'électricité. L'argument porte dans une opinion publique qui a vu l'envolée de ses factures avec le développement des renouvelables.

Début 2019, l'Allemagne a trouvé un compromis entre les différentes parties prenantes destiné à totalement arrêter l'exploitation du lignite d'ici 2038. Longuement négocié, le plan de sortie du charbon prévoit la reconversion des activités liées à son exploitation, des aides à la création d'activités nouvelles, de multiples indemnisations pour ceux que frappe le désinvestissement des mines. Ce compromis repose sur un engagement financier de l'État de l'ordre de 80 milliards d'euros sur 20 ans. Des sommes qui viendront s'ajouter à celles requises pour arrêter, d'ici 2022, les réacteurs nucléaires encore en service.

Deux décennies pour sortir le charbon du secteur électrique dans un pays réputé avoir une conscience écologique élevée et capable d'aligner 80 milliards d'argent public pour accompagner l'opération. Combien faudra-t-il de temps au voisin polonais dont la dépendance au charbon est encore plus importante ? Il ne faut pas compter sur son volontarisme politique : en Pologne, un consensus est vite trouvé pour défendre le minerai national contre l'alternative du gaz que pourrait fournir en abondance le grand voisin russe. Beaucoup dépendra de l'évolution des conditions économiques et du prix du CO<sub>2</sub>. Durant la dernière décennie, le Royaume-Uni a réduit comme peau de chagrin l'électricité produite à partir du charbon grâce à une taxe nationale s'ajoutant au prix des quotas de CO<sub>2</sub> sur le marché européen. Sitôt que le coût des dommages climatiques est correctement imputé dans les prix, l'équation économique en faveur du charbon s'inverse. Si la réforme du marché européen des quotas adoptée en 2018 aboutit à une remontée durable du prix du carbone, cela accélérera la sortie du charbon en Pologne.

## **LE PARI PERDU DE DONALD TRUMP**

On peut en effet avoir beaucoup de charbon et réduire son utilisation pour des raisons économiques. Aux États-Unis, l'équation économique joue depuis une quinzaine d'années au profit du gaz. L'exploitation des gaz de schiste a fait du gaz d'origine fossile une ressource disponible en quantité, à des prix de l'ordre de moitié de ceux du gaz naturel en Europe. La majorité des centrales au charbon ont été construites avant 1990. Le parc a vieilli et son taux d'utilisation a baissé du fait de la concurrence du gaz. Les centrales déclassées ne sont pas remplacées. On leur substitue des centrales à gaz, très flexibles et performantes, et de plus en plus de renouvelables. Comme simultanément la sidérurgie américaine a décliné, la consommation de charbon a baissé de 40 % depuis le pic atteint au milieu des années 2000<sup>5</sup>.

Malgré tous ses efforts, Donald Trump peut difficilement contrarier ces tendances lourdes. À l'origine de la moitié de l'électricité produite au milieu des années 2000, le charbon en fournit moins de 30 % en 2018. Si le déclin du charbon américain peut être freiné par l'administration Trump, ce sera grâce à une reprise des exportations. Les États-Unis disposent du quart des réserves mondiales de charbon. Leur marché intérieur ne pourra en absorber qu'une part déclinante. Soit la plus grande partie de ce stock restera en terre, soit elle sera exportée.

Deux acteurs dominent le marché international du charbon : l'Indonésie et l'Australie. Ils sont plus compétitifs que les États-Unis, du fait de terminaux d'exportation plus proches des côtes et bien raccordés aux zones d'extraction. Les mines américaines les plus productives se trouvent dans le Wyoming et les autres États de l'Ouest. Pour accroître la capacité d'exportation nationale, l'administration Trump soutient les projets d'investissement destiné à accroître la capacité de transport ferroviaire vers les terminaux

portuaires du Pacifique dont la construction est projetée en Oregon, dans l'État de Washington et en Colombie-Britannique. Ces projets suscitent de vigoureuses oppositions locales et la multiplication des recours devant les tribunaux.

Ces batailles juridiques ont été moins médiatisées que celles freinant la construction de l'oléoduc Keystone XL destiné à raccorder les pétroles de schiste canadiens au golfe du Mexique. Elles sont pourtant d'une importance cruciale pour les scénarios climatiques de demain. Les réserves de charbon américain représentent à elles seules un potentiel d'émission de l'ordre de 530 Gt de CO<sub>2</sub>, soit 15 ans d'émissions mondiales au niveau atteint en 2017. Un accroissement de la capacité d'exportation vers l'Asie où la demande est forte pourrait contrebalancer le déclin inexorable du marché domestique et freiner d'autant la marche vers la neutralité carbone.

## **LE COCKTAIL INDIEN : CHARBON + PHOTOVOLTAÏQUE**

Le <sup>e</sup>xxi<sup>e</sup> siècle a démarré par une envolée de l'utilisation du charbon, portée par la Chine et l'Inde. À eux deux, ces pays consomment désormais un peu moins de deux tiers du charbon mondial. Leurs ressources locales n'étant pas illimitées, ils en sont devenus les deux premiers importateurs sur un marché en forte expansion. Si on se réfère aux accords de Paris, ces pays ont déposé des contributions nationales suffisamment flexibles pour leur permettre de poursuivre sur cette tendance pendant la prochaine décennie. Peut-on pour autant escompter un changement de trajectoire ?

Les deux pays disposent de parcs de centrales thermiques récents qui continuent de s'élargir, à un rythme, il est vrai, ralenti

dans le cas de la Chine<sup>6</sup>. La demande de charbon à coke pour les aciéries n'est pas en reste, la Chine produisant la moitié de l'acier mondial et l'Inde étant en passe de dépasser le Japon pour devenir le numéro deux mondial. Compte tenu de la vitesse du mouvement, réduire rapidement l'usage du charbon au cours des prochaines décennies équivaldrait à un véritable tête-à-queue. Une manœuvre hautement risquée pour un véhicule lancé à pleine vitesse.

En Inde, le raccordement de la totalité des villages au réseau électrique est une priorité de rang un de Narendra Modi. Pour y parvenir, le pays communique beaucoup sur son plan solaire dont l'ambition ne cesse d'être réévaluée. Soutenus par les bailleurs occidentaux, les investissements dans le solaire dépassent depuis 2018 ceux dédiés aux centrales à charbon. Les capacités installées en renouvelable (hydraulique incluse) ont atteint un tiers de la puissance totale du parc électrique. Mais leur taux d'utilisation ne rivalise pas avec celui du charbon qui assure encore les trois quarts de la génération d'électricité.

Dans le solaire, le changement d'échelle a provoqué une baisse spectaculaire des coûts. Mesuré au seul niveau de la production, le coût du kWh photovoltaïque devrait passer en dessous de celui du kWh d'origine thermique au début de la décennie 2020<sup>7</sup>. Faut-il, dès lors, anticiper un retrait spontané du charbon devenu moins rentable que le solaire ? À long terme, cela ne fait guère de doute. Mais au bout de combien de temps ?

L'Inde est entrée dans les premières phases d'un cycle de croissance « à la chinoise », avec une démographie plus rapide et une part plus importante de la population proche des seuils de pauvreté absolue. Le mouvement crée un appel d'air considérable sur le marché électrique dont la croissance, de l'ordre de 7 % l'an, ne devrait pas fléchir, sauf accident économique. Sur la dernière

décennie, la demande de charbon pour la production électrique s'est accrue un peu plus rapidement. Durant les prochaines années, ce rythme devrait ralentir, en partie grâce aux gains d'efficacité des nouvelles centrales qui permettent d'économiser le combustible, mais surtout grâce à une substitution s'opérant principalement vers le solaire. Une telle substitution exige cependant des investissements supplémentaires dans le réseau pour mieux stocker et distribuer le courant.

Si on réintègre l'ensemble des coûts associés à l'intermittence, le charbon restera plus longtemps la source la moins coûteuse pour produire les kWh. La situation serait tout autre si on réintégrait dans le prix du kWh le coût des externalités climatiques et environnementales : avec le miracle économique, l'air devenu irrespirable dans les grandes villes indiennes génère des dommages sanitaires croissants. Sous l'angle climatique, les émissions indiennes de CO<sub>2</sub>, encore très basses par tête d'habitant, ne vont pas tarder à dépasser les émissions européennes.

La percée économique indienne avec son objectif d'accès à tous à l'électricité et son cocktail charbon + photovoltaïque constitue une opportunité pour Coal India, la société constituée au lendemain de la nationalisation des mines en 1973. Contrôlée à 90 % par l'État indien, cette société est la première entreprise charbonnière au monde. Dans les États charbonniers situés à l'est du pays, Coal India fait figure de contrepoids face aux mafias privées qui prospèrent sur l'exploitation illégale des mines. En 2014, sa position a été confortée par l'arrêt de la Cour suprême qui a mis un terme au scandale du « Coalgate » en annulant les licences concédées à titre dérogatoire au secteur privé. Dans les États déshérités comme le Jharkhand qui dispose de 40 % des réserves minières du pays, Coal India est la première source de revenus des gouvernements locaux



et un important pourvoyeur d'infrastructures. Un moyen de faire oublier la dégradation de la qualité de l'air dans les grandes villes et aussi les affaires de corruption publique dans lesquelles a pu être impliquée l'entreprise.

Durant la dernière décennie, Coal India a été dépassée par la poussée charbonnière : l'Inde est devenue le second importateur mondial, talonnant la Chine. La société doit se rattraper durant la prochaine décennie. Le gouvernement compte l'aiguillonner dans le cadre d'un plan de relance charbonnier entrouvrant l'activité minière aux capitaux privés. Le plan stratégique, approuvé par le gouvernement, vise à remonter la production vers 1 milliard de tonnes dès 2020 et dans une fourchette de 1,3 à 1,9 milliard de tonnes en 2030<sup>8</sup>. La sortie du charbon sera pour plus tard !

## **CHINE : FREINER SUR LE CHARBON EN ÉVITANT LE TÊTE-À-QUEUE**

En Chine, le treizième plan quinquennal (2016-2020) a donné un sérieux coup de frein au charbon, imposant la fermeture des installations les plus polluantes situées à proximité des villes et parfois de mines très déficitaires dans le nord du pays. Simultanément, un formidable coup d'accélérateur a été donné aux énergies renouvelables.

Politiquement, l'objectif prioritaire est de freiner les pollutions locales qui empoisonnent les villes en suscitant un mécontentement croissant. Comme à Londres après l'hiver 1956, de nouvelles réglementations prohibent désormais l'usage des poêles à charbon en ville. Économiquement, la stratégie vise une montée en gamme dans la sidérurgie où le Plan pousse les provinces à fermer les unités les plus vétustes et surtout à faire la course en tête dans les

énergies renouvelables et la mobilité électrique. Un autre motif stratégique n'est pas totalement absent : les réserves de charbon chinois représentent moins de 40 années de production. La boulimie pour le minerai pourrait buter sur le mur des limites géologiques.

Comme souvent en Chine, ces mesures ont eu un effet immédiat. La demande de charbon a décliné entre 2014 et 2016. Repartie à la hausse en 2017, elle s'est accélérée en 2018. Le développement massif des capacités solaires et éoliennes vient s'ajouter aux capacités thermiques existantes, sans s'y substituer. La Chine poursuit son équipement en centrales à charbon dernier cri, bien plus efficaces que les anciennes, produites par une industrie nationale qui n'a pas subi les déboires de ses concurrents occidentaux. Les contraintes d'équilibrage du réseau s'accroissent à mesure que le poids des énergies de flux augmente. Malgré l'appoint des autres sources (gaz et nucléaire), le charbon reste le pilier du système et ne sera délogé que graduellement par le renouvelable. Pour réduire rapidement la quantité de charbon utilisée, il faudrait que le marché électrique subisse un grand coup de frein, ce qui est difficilement compatible avec les aspirations d'une classe moyenne de plus en plus gourmande et avec le basculement vers la mobilité électrique. La mise en route effective du système national de quotas de CO<sub>2</sub> à partir de 2020 ne devrait pas changer la donne du fait de plafonds d'émission peu contraignants.

La constitution en 2017 du groupe China Energy Investment, fusion du premier opérateur minier et de la quatrième entreprise électrique du pays, reflète les ambitions et les contradictions chinoises. Ce nouveau géant asiatique emploie plus de 300 000 personnes pour un chiffre d'affaires dépassant 75 milliards de dollars. Il produit à lui seul plus de charbon que l'Australie,

dispose d'une capacité de production électrique pratiquement double de celle de la France et d'installations portuaires sans équivalent pour transporter du charbon dans sa flotte de 61 navires. Même si China Energy Investment est présent et se renforce dans l'éolien, son cœur de métier reste le transport, le négoce et la transformation du charbon. Pour ce nouveau géant chinois, un abandon du charbon équivaldrait à une sortie de route.

Éviter un tel tête-à-queue explique les ambiguïtés de la stratégie énergétique chinoise qui n'est pas sans conséquences sur le plan mondial. En toile de fond de la constitution de China Energy Investment, les institutions financières publiques chinoises continuent de financer l'extension de capacités de production thermique, aussi bien sur le plan domestique qu'à l'international. Au cours de la décennie 2010, la Chine a établi une domination éhontée sur le marché naissant du panneau photovoltaïque, supplantant les industriels japonais et allemands. Elle est également devenue la première pourvoyeuse de fonds et de savoir-faire pour le développement des centrales à charbon. Dans le cadre de l'initiative « route de la soie » désormais rebaptisée « Belt and Road », le gouvernement chinois continue de financer des centrales à charbon dans plus d'une dizaine de pays, rendant assez inopérantes les restrictions imposées par les bailleurs de fonds occidentaux<sup>9</sup>.

## **BIENVENUE AU CLUB DES NOUVEAUX CHARBONNIERS !**

Les dynamiques charbonnières de la Chine et de l'Inde sont portées par des politiques souveraines qui échappent aux normes que tentent d'imposer les bailleurs de fonds internationaux. Ces nouvelles normes, discutées en marge de tous les sommets climatiques, visent à accélérer la sortie du charbon par rationnement

de son financement. Après son retrait en novembre 2018 d'un projet de nouvelle centrale au lignite au Kosovo, la Banque mondiale n'a ainsi plus aucune nouvelle centrale thermique en portefeuille. L'impact de ces mesures est cependant contrarié par les financements publics provenant de Chine, mais aussi de Corée, du Japon et du Proche-Orient, qui contribuent à élargir le club des utilisateurs sur un marché mondial du charbon qui s'élargit.

Dans les années 1970, moins de 10 % du charbon produit dans le monde donnait lieu à un échange international. Un quart de la production s'échange désormais sur un marché global où la vigueur de la demande a provoqué une remontée des cours entre 2016 et 2018. La Chine et l'Inde y ont supplanté les acheteurs traditionnels : Japon, Corée et Europe à titre principal. L'Australie et l'Indonésie approvisionnent ce marché à plus de 55 %.

Durant la prochaine décennie, les demandes chinoises et indiennes vont se modérer, voire décliner. Mais de nouveaux acheteurs pointent sur le marché, susceptibles de combler le vide créé. Dans leur majorité, ces nouveaux acheteurs ne disposent pas de ressources en charbon. Ils sont attirés par le faible coût de la production électrique thermique, la rapidité de sa mobilisation et les facilités de financement octroyées par les nouveaux bailleurs de fonds, le plus souvent chinois ou issus du Proche-Orient.

Carine Sebi et Bruno Lapillone ont recensé ces nouveaux convertis au charbon dans une étude très documentée<sup>10</sup>. Les projets des nouveaux pays charbonniers totalisent une capacité additionnelle de production électrique de l'ordre de 50 GW devant être déployée avant 2025. Cinquante GW, c'est à peu près la totalité de la puissance installée en Afrique au sud du Sahara (hors Afrique du Sud). Parmi ces nouveaux convertis, on trouve trois pays asiatiques, dont le Bangladesh qui projette à lui seul d'installer 23

centrales thermiques à l'horizon 2027, grâce à la coopération chinoise. L'Amérique latine compte 3 nouveaux venus, pour des projets de petite dimension, et le Proche-Orient, 2.

L'Afrique fournit, à elle seule, 9 nouveaux candidats, qui, à l'exception de la Tanzanie, ne disposent pas de mines de charbon. Parmi eux, le Maroc qui accroît sa capacité d'importation de charbon alors que son voisin algérien est abondamment pourvu en gaz naturel, et l'Égypte où les pénuries de courant sur le réseau national sont devenues une plaie quotidienne. Les autres pays sont tous situés au sud du Sahara où le solaire effectue simultanément une percée très rapide. Face à une demande d'électricité qui s'accélère, certains pays s'engagent dans une voie qui rappelle celle de l'Inde, avec son cocktail photovoltaïque + charbon.

## **FABRIQUER DE L'ACIER EN SE PASSANT DU CHARBON**

Après les centrales électriques, les hauts fourneaux sont les plus gros consommateurs de charbon. Ils en utilisent à peu près autant que tous les autres secteurs industriels réunis. Dans l'industrie, lorsque le charbon est utilisé comme combustible, on peut lui trouver des substituts comme dans le cas de la génération électrique. Dans les hauts fourneaux, le charbon sert à la fois de combustible et d'agent réducteur du minerai de fer. Dans le cadre des technologies actuelles, on ne parvient guère à lui trouver de substitut pour la production primaire d'acier. C'est pourquoi la sidérurgie est, devant le ciment, le secteur industriel qui émet le plus de CO<sub>2</sub> dans le monde.

Les leviers permettant de réduire l'empreinte carbone de l'acier existent, mais ils ne pourront être mis en place que progressivement et sous certaines conditions économiques. Le recyclage des aciers

en fin de vie est une première voie. En 2017, un peu plus d'un quart de la production d'acier a été réalisée sans charbon, dans des fours électriques qui utilisent la ferraille comme matière première, ce qui permet de diviser par trois à cinq l'empreinte carbone de l'acier. On ne peut pas augmenter rapidement la proportion d'acier recyclé, car le gisement de matière première est limité : la première qualité de l'acier est sa résistance. Il ne produit son déchet qu'au bout de longues années.

Une deuxième voie consiste à freiner l'utilisation de l'acier en lui trouvant des substituts. Entre 2000 et 2015, la consommation d'acier dans le monde a doublé. Une tonne sur deux est utilisée dans la construction. La pression conjuguée de la démographie et de l'urbanisation dope les constructions utilisant les structures métalliques, surtout dans les pays émergents. On sait techniquement substituer l'acier par du bois dans un nombre croissant de cas, y compris dans les constructions en hauteur. Mais entre les projets pilotes et la production de masse, il y a un fossé, surtout quand on est engagé dans une course de vitesse pour loger correctement des centaines de millions de personnes qui veulent échapper à leurs habitats précaires. Il est difficile d'imaginer un monde en 2050 où on est parvenu à améliorer les conditions de vie et d'habitat dans les pays les moins avancés en faisant reculer la consommation d'acier.

Une troisième voie consiste à développer des procédés permettant de produire de l'acier primaire sans émettre de CO<sub>2</sub>. L'Europe a fait figure de pilote avec le programme UCLOS destiné à tester la faisabilité à échelle industrielle de procédés capturant le CO<sub>2</sub> à la sortie des cheminées pour le réinjecter en sous-sol. Le retrait d'Arcelor Mittal en 2012 a mis un coup d'arrêt au projet et provoqué la fermeture définitive du site lorrain de Florange qui aurait

pu être le premier haut fourneau au monde à produire de l'acier sans émettre de CO<sub>2</sub>. Une voie alternative est travaillée en Suède dans le cadre du projet Hybrit associant le principal producteur d'électricité aux deux sidérurgistes du pays. Elle teste une technologie qui permettrait de produire de l'acier primaire sans utiliser de charbon et en ne mobilisant que des sources énergétiques renouvelables. Son déploiement à échelle industrielle n'est cependant pas attendu avant 2030<sup>11</sup>.

Quel que soit l'angle par lequel on prend la question, la réduction de l'empreinte carbone de l'acier semble plus difficile à atteindre que celle de la production électrique. Baisser les consommations d'acier semble un pari impossible tant que le monde émergent progresse rapidement. Les procédés pour produire de l'acier primaire sans émettre de CO<sub>2</sub> ont été identifiés, mais leur déploiement à grande échelle se heurte à des contraintes économiques. Il faudrait un prix du CO<sub>2</sub> supérieur à 50 ou 60 euros la tonne pour rentabiliser la capture et le stockage de CO<sub>2</sub>. Encore faut-il rappeler que ces estimations techno-économiques négligent le coût de l'acceptabilité sociale du transport et du stockage du CO<sub>2</sub> qui semble particulièrement élevé en Europe.

Un monde en 2050 avec de l'électricité et sans émissions de CO<sub>2</sub> est imaginable. Il suppose des changements radicaux dans le fonctionnement de l'économie qui accélèrent le désinvestissement dans le charbon. Nous avons plus de difficultés à imaginer le monde de 2050 avec de l'acier et sans rejets de CO<sub>2</sub>. C'est pourtant celui-là qu'il faut construire si on veut contenir le réchauffement global en dessous de 2 °C.

## **FIN DE PARTIE POUR LE PÉTROLE ?**

Malgré l'incroyable résistance du charbon au temps, le pétrole reste la première source d'énergie mobilisée dans le monde. Plusieurs fois annoncé pour cause d'épuisement des réserves en terre, son déclin tarde à se manifester. Si l'abondance du charbon ne fait pas débat, la question des réserves de pétrole est plus controversée. La géologie pourrait-elle devenir l'alliée de la cause climatique en précipitant l'abandon du pétrole ?

Dans son *Or noir*, Matthieu Auzanneau retrace les premières étapes de l'industrie pétrolière. Au début du siècle dernier, un baril de pétrole sur deux est produit à Bakou. Les frères Nobel, la famille Rothschild, le jeune Gulbenkian, les capitalistes du monde entier se précipitent sur les rives de la mer Caspienne. Le pétrole affleure à la surface et jaillit comme une « fontaine d'or noir fabuleuse<sup>12</sup> ». Il est bien moins coûteux à extraire que celui de Pennsylvanie où a démarré l'aventure pétrolière quelques décennies plus tôt.

Entre la première moitié du xx<sup>e</sup> siècle et la décennie 1970, les nouvelles découvertes s'enchaînent. Les réserves pétrolières semblent inépuisables. À l'instar des autres matières premières, le prix relatif du baril diminue tendanciellement, ce qui dope sa consommation. À la fin des années 1960, elle dépasse celle de charbon. Les deux chocs pétroliers marquent un point de rupture dans cette tendance séculaire. Ils inaugurent une nouvelle phase d'instabilité des cours pétroliers.

Au lendemain du premier choc pétrolier, les pays de l'OCDE créent l'Agence internationale de l'énergie (AIE) pour les aider à sécuriser leurs approvisionnements en déjouant les mauvaises surprises. L'Agence estime alors les réserves mondiales à un peu plus de 40 années de production. Près d'un demi-siècle plus tard, la production de pétrole a augmenté de moitié et les réserves estimées sont voisines de 50 années de production. Où est l'erreur ?



Il n'y a pas d'erreur. On continue à extraire du pétrole à Bakou en 2019, mais il faut aller le chercher en Caspienne, plusieurs centaines de mètres au-dessous du niveau de la mer. La dynamique de l'offre pétrolière et gazière repose sur la mobilisation de capitaux considérables, par des compagnies qui ne cessent d'aller chercher le pétrole de plus en plus loin, au nord en zone arctique, en eaux profondes sous le niveau de la mer, dans des gisements dont on récuré tous les recoins grâce à la récupération assistée.

Dans les années 1990 et 2000, de nouveaux entrants sur ce marché ont développé des innovations techniques – la fracturation hydraulique et les forages horizontaux – qui permettent d'aller chercher des huiles piégées dans des formations rocheuses ou sableuses. L'extraction des pétroles de schiste a considérablement accru les réserves en ajoutant des sources non conventionnelles. L'épuisement des puits traditionnels est compensé par la capacité technique à récupérer une fraction croissante de la ressource globale. Résultat : depuis le milieu des années 1990, les réserves progressent plus vite que l'extraction, ce qui modifie le paysage géopolitique. Le Venezuela dépasse l'Arabie saoudite en termes de réserves. Le Canada a multiplié par quatre les siennes grâce aux gisements de l'Alberta. Les États-Unis, longtemps premier importateur mondial, sont en passe de devenir autosuffisants.

En termes de potentiel d'émission de  $\text{CO}_2$ , les réserves en terre de pétrole représentent environ le quart de celles de charbon. Si on les pompait intégralement, cela suffirait à totalement épuiser le budget carbone donnant deux chances sur trois de limiter le réchauffement à 2 °C. Mais à la différence du charbon, les réserves de pétrole s'élargissent rapidement du fait des gisements non conventionnels. Dans son fonctionnement actuel, l'économie de la

rente pétrole incite à l'accroissement des réserves exploitables en éloignant l'horizon de la sortie du pétrole.

**Figure 7.1 Bakou en 1900**



*Vers 1900, les puits se multiplient à Bakou où le pétrole est en surface. Bakou fournit alors la moitié de la production mondiale. Aujourd'hui, il faut forer au fond de la Caspienne pour produire des hydrocarbures.*

Source : [https://dipnot.hypotheses.org/1651/boom\\_petrolier05](https://dipnot.hypotheses.org/1651/boom_petrolier05)

## **L'IMPLACABLE MÉCANIQUE DE LA RENTE**

Les mouvements de yo-yo des cours pétroliers sont suivis de près par les macroéconomistes, car ils interagissent avec le niveau

de l'activité globale. Quand le baril de brut se renchérit sur les marchés internationaux, cela érode le pouvoir d'achat des consommateurs et pèse sur les coûts de production des activités gourmandes en énergie. Comme on peut difficilement se passer de pétrole à court terme, cela plombe l'activité. En France, on estime qu'une hausse d'un cinquième du prix du baril coûte environ 0,2 point de croissance.

On peut se demander si cette vision n'est pas simpliste. La hausse du prix du pétrole ne devrait opérer qu'un transfert de valeur entre producteur et consommateur, et donc conduire à un déplacement géographique de la valeur ajoutée dans le monde plutôt qu'à une baisse de l'activité.

Le raisonnement tient si on ne considère que les flux de marchandises. Mais n'oublions pas le stock des dettes. Plusieurs décennies de libéralisation financière ont provoqué une hausse de l'endettement et créé de nouvelles fragilités. On l'a vu par exemple lors de la crise de 2008 : un baril à plus de 140 dollars a contribué à rendre un nombre croissant de ménages américains incapables de rembourser leur dette immobilière, ce qui a précipité la chute de la banque d'investissement Lehman Brothers. Il faut aussi tenir compte de l'effet du renchérissement du baril sur le stock d'endettement qui fragilise structurellement les économies pour anticiper correctement son impact économique.

À partir de ce genre de constat, des observateurs comme Jean-Marc Jancovici anticipent un effondrement de l'économie provoquée par l'envolée du prix du pétrole consécutif à l'épuisement des réserves<sup>13</sup>. Dans un tel scénario, la géologie deviendrait l'alliée de la cause climatique en forçant la sortie du pétrole. Mais les yo-yo des cours pétroliers annoncent-ils vraiment le pic pétrolier et l'épuisement de l'or noir ?

D'après l'économiste Nicolas Bouleau, les cours des matières premières seraient désormais totalement décorrélés des variables de l'économie réelle et donc inaptes à nous informer sur le degré de rareté des stocks en terre<sup>14</sup>. Cette observation est justifiée si on l'applique à la ressource totale. Le marché du pétrole n'a pas un horizon de temps suffisant pour que le niveau de la ressource ultime de pétrole soit pris en considération. En revanche, son fonctionnement révèle le côté diabolique pour le climat de la mécanique de la rente pétrole qui incite les producteurs à élargir les réserves économiquement exploitables.

L'économie de la rente pétrole présente une double face : la rente de rareté et la rente différentielle. D'un cycle à l'autre, cette double face incite les compagnies à extraire toujours plus de pétrole.

Lorsque la rareté relative du pétrole augmente, pour des raisons géologiques ou géopolitiques, le prix du baril s'envole. Il peut dépasser 100 dollars le baril, comme en 2008 ou en 2011-2014. Sous l'angle de la demande, un pétrole plus cher incite à faire plus attention à ses achats de carburant, de fioul et des innombrables produits dérivés du pétrole. Cela pénalise le consommateur, mais est bienfaisant pour le climat. Pour un militant écologiste, entre la perte de quelques points de croissance et le sauvetage de la Planète, il n'y a pas photo. C'est pourquoi on considère souvent qu'un renchérissement du pétrole est une mauvaise affaire pour l'économie, mais plutôt une bonne nouvelle pour le climat.

C'est vrai du côté de la demande. Mais côté offre, le renchérissement du pétrole envoie une incitation malfaisante pour le climat. À mesure que le prix du baril s'élève, les compagnies captent une rente de rareté supplémentaire qui les incite à investir pour accroître leur réserve. Il devient de plus en plus rentable d'aller chercher le pétrole dans les gisements les moins bien situés, donc

bien plus coûteux : à quelques milliers de mètres sous la mer, dans la zone arctique ou dans les sables bitumineux. À chaque cycle haussier du prix du pétrole, on assiste ainsi à une reprise des investissements d'exploration-production qui feront les émissions de CO<sub>2</sub> de demain.

Le surcroît d'offre réalisé grâce à une plus grande mobilisation des réserves finit par rattraper une demande qui est par ailleurs ralentie par la hausse du prix. Le cycle se retourne. C'est le phénomène habituel des « contrechocs pétroliers » qui détend à court terme les contraintes économiques. Cette baisse stimule la demande et favorise la reprise des émissions de CO<sub>2</sub>. Une mauvaise nouvelle à court terme pour le climat, d'autant plus que les producteurs révèlent une résilience insoupçonnée à la baisse des cours. C'est ici que joue pleinement la deuxième face de la rente pétrole : la rente différentielle.

Dans leur grande majorité, les producteurs empochent un second bonus qui résulte de la différence entre leurs coûts d'exploitation et ceux des champs les moins bien situés où l'extraction est la plus coûteuse. Ce bonus est appelé rente « différentielle », ou rente « ricardienne » du nom de l'économiste Ricardo qui, le premier, en vit toute l'importance dans l'économie. Lorsque le baril tombe à 20 dollars, les producteurs les moins bien positionnés souffrent. Mais le champ de Ghawar en Arabie saoudite est encore très rentable : son coût de production est de l'ordre de 5 à 7 dollars le baril. Son exploitant, la compagnie nationale Aramco, n'est pas près de sortir du marché. La rente différentielle protège la grande majorité des producteurs en phase de baisse des cours. En bas de cycle, les compagnies pétrolières font le dos rond. Elles guettent le regain de demande induit par la baisse des prix et se

préparent à accroître leurs investissements lors du prochain cycle haussier.

Cette dynamique peut durer longtemps, sauf si on met en place un mécanisme correcteur. Si on instaure une taxe pour internaliser le coût des dommages climatiques associés à l'utilisation du pétrole, on casse la dynamique de la rente pétrole : le prix du carbone insère un coin entre les coûts de production du baril et le prix des produits pétroliers à la consommation. Si le prix du carbone est suffisamment élevé, la rente pétrole est rapidement pompée par la rente carbone qui sera perçue par tous les opérateurs capables de fournir les mêmes services énergétiques que le pétrole en émettant moins de CO<sub>2</sub>. L'une des voies possibles pour accélérer la sortie du pétrole.

## **LE MOTEUR DE RUDOLF DIESEL EN BOUT DE COURSE**

Sur 100 tonnes de pétrole produites dans le monde, près de 60 sont utilisées pour se transporter sur route, en mer ou dans les airs. Depuis le premier choc pétrolier, la hausse de la consommation de pétrole s'est ralentie. Son utilisation a privilégié les deux secteurs où il semblait difficile de lui trouver des substituts : le transport et la pétrochimie. Or, dans chacun de ces deux secteurs, des substituts aux incontestables avantages comparatifs sont apparus. C'est peut-être du côté de la demande que se trouvent les ressorts conduisant à accélérer le retrait du pétrole.

Dans le transport terrestre, le moteur à combustion interne, inventé par Rudolf Diesel à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, a imposé une suprématie sans partage en gagnant, au début du siècle dernier, une première bataille contre la voiture électrique. Une victoire que Diesel, mystérieusement disparu une nuit de 1913 à bord d'un paquebot faisant route vers l'Angleterre, n'eut pas vraiment le temps de goûter.

Le génial ingénieur n'avait aucun lien avec l'industrie du pétrole. Il avait testé son fameux moteur en utilisant une huile de cacahuète mise au point par ses soins ou du charbon pulvérisé.

Cette victoire du véhicule thermique fut gagnée en dépit des nombreux avantages de la mobilité électrique. Deux à quatre fois plus efficace sous l'angle énergétique que son concurrent thermique<sup>15</sup>, le véhicule électrique ne fait pas de bruit et, surtout, ne rejette pas de fumées qui, outre le CO<sub>2</sub>, contiennent de multiples polluants dégradant la qualité de l'air ambiant. Son développement se heurta tout au long du siècle dernier à la question de l'autonomie. On ne savait pas stocker de grandes quantités de courant sur le véhicule ou le produire grâce à une pile à combustible embarquée utilisant de l'hydrogène et rejetant de l'eau. Deux procédés dont le déploiement va faire disparaître l'usage du moteur à explosion au cours des prochaines décennies. Toute la question pour le climat (et pour les vendeurs de fossiles) est de savoir en combien de temps.

On a produit un peu plus d'1 million de voitures électriques en 2017. Même si c'est dix fois plus que cinq ans auparavant, cela ne représente que 1,2 % du marché mondial. Comme il y a plus d'1 milliard de véhicules particuliers en circulation, les modèles électriques restent encore bien rares, sauf en Norvège ou dans certaines villes chinoises où les incitations publiques ont dopé les ventes. Mais cette situation est promise à s'inverser pour des raisons environnementales et économiques.

Avec le chauffage urbain, la circulation automobile est une source majeure de dégradation de la qualité de l'air dans les villes, aux conséquences sanitaires de mieux en mieux documentées. Contrairement aux impacts du changement climatique souvent présentés de façon diffuse et lointaine, ces impacts touchent la santé de vos proches : les enfants qu'on accompagne à l'école ou

votre grand-mère qui ne parvient plus à respirer. La lutte contre ce type de pollution locale bénéficie d'un soutien social important qui contraint les autorités publiques à réagir.

L'économie du véhicule électrique rappelle celle des énergies renouvelables : le coût d'achat est encore supérieur à celui d'un véhicule thermique du fait des surcoûts des batteries. Mais une fois acheté, le véhicule électrique revient moins cher à utiliser, surtout si on fait le plein de courant à un moment où le prix de l'électricité n'est pas élevé. Par ailleurs, les infrastructures de recharge ne sont pas aussi bien diffusées que les stations-service vendant des carburants. C'est la raison pour laquelle les premières étapes de la diffusion des véhicules électriques ont été subordonnées à des soutiens publics conséquents.

Mais on est en train de changer d'échelle de production, ce qui va faire baisser les coûts des batteries et autres composants spécifiques au véhicule électrique et le rendre de plus en plus compétitif face à ses homologues thermiques. Tous les constructeurs mondiaux l'ont bien compris, engagés malgré eux dans une nouvelle compétition qui pourrait faire des dégâts. Comme à chaque tournant technologique majeur, le changement de motorisation modifie les règles du jeu concurrentiel en créant des opportunités pour de nouveaux entrants. En France, Renault a vu venir le changement avant PSA, longtemps aveuglé par sa culture maison du diesel. Les deux constructeurs sont désormais lancés dans la course, chaque fois avec des alliances asiatiques plus ou moins faciles à gérer.

En 2030, on devrait compter d'après l'AIE entre 125 et 220 millions de véhicules électriques légers (voitures et pick-up) en circulation, soit des taux de pénétration respectifs de 6 et 12 %. L'hypothèse la plus favorable laisse encore près de 9 véhicules



légers sur 10 fonctionner avec un moteur à combustion interne. Dans ce scénario, la consommation de pétrole est infléchie, mais elle ne diminue pas car le parc automobile continue de progresser fortement.

Le cabinet Enerdata estime qu'en 2040 les véhicules électriques légers pourraient représenter de 24 à 44 % du parc. Le scénario haut permet de faire baisser la consommation de pétrole. Dans ce scénario, les voitures électriques, de plus en plus nombreuses, chassent les voitures thermiques, car le parc total connaît une moindre progression. L'usage de la voiture particulière a en effet reculé. On est passé d'une logique de l'empilement, dans laquelle le véhicule électrique s'ajoute au véhicule thermique, à une logique de substitution qui, seule, permet d'atténuer les changements du climat.

Freiner, voire inverser, la croissance du parc automobile pose de multiples questions sur la place du véhicule individuel. Pour 100 habitants, on dénombre de l'ordre de 70 véhicules automobiles en Amérique du Nord, 60 dans l'Union européenne, 20 en Amérique latine et en Chine, moins de 10 en Inde et 4 en Afrique. Quel que soit le rythme de croissance du véhicule électrique, le recul du véhicule thermique demeure un objectif éloigné si on converge vers les taux américains. Il devient plus accessible si on parvient à inverser la tendance en visant des taux plus bas. Une question de choix de société.

Pour les véhicules deux roues et les flottes captives en milieu urbain (bus notamment), le basculement à l'électricité, déjà largement engagé en Chine, sera plus rapide que pour les voitures particulières : leurs avantages compétitifs sont patents. Pour le transport de marchandise terrestre, la voie sera plus longue, car le poids des batteries devient vite un obstacle.

Le transport maritime utilise depuis des décennies des carburants de mauvaise qualité qui permettent d'utiliser des produits lourds émettant plus de particules fines et d'oxydes d'azote que ceux utilisés dans les voitures ou nos chaudières au fioul. À partir de 2020, les normes environnementales édictées par l'Organisation internationale du transport maritime vont contraindre les armateurs à réduire ces pollutions locales. En l'absence de normes plus sévères concernant le CO<sub>2</sub>, ceci ne profitera guère aux alternatives décarbonées comme la voile, la pile à combustible ou le biogaz. Pour se mettre aux normes, les armateurs prévoient soit d'équiper leurs cheminées de filtres, soit de basculer vers le gaz naturel, l'énergie fossile dont l'usage a le plus augmenté depuis le premier choc pétrolier.

## **LE GAZ NATUREL, « ÉNERGIE DE TRANSITION » DES PÉTROLIERS**

Contrairement au charbon et au pétrole dont les usages ont eu tendance à se spécialiser sur l'électricité et le travail des métaux pour le premier, le transport et la pétrochimie pour le second, le gaz a vu ses débouchés s'élargir. On utilise traditionnellement le gaz pour produire de la chaleur. Il est devenu une source intéressante pour fabriquer de l'électricité. Sa purification permet d'obtenir de l'éthane qui concurrence le naphta issu du pétrole, aux multiples usages industriels. Au prix de modifications assez mineures, le gaz peut remplacer les carburants dans les véhicules terrestres et bientôt dans les bateaux.

Sur le plan écologique, l'intérêt du gaz est qu'il émet bien moins de particules fines et d'oxydes d'azote, ce qui fait dire à ses promoteurs qu'il s'agit d'une « énergie propre ». Le gaz d'origine

fossile contribue pourtant au réchauffement climatique. Pour produire une même quantité d'énergie, il génère au moment de sa combustion environ la moitié des rejets de CO<sub>2</sub> du charbon et les trois quarts de ceux du pétrole. Pour le gaz liquéfié, il faut y ajouter les émissions nécessaires pour sa transformation en liquide lors du transport. Enfin, les fuites de méthane lors de son extraction et de son transport s'ajoutent à l'addition qui peut être salée dans le cas d'extraction de gaz de schiste opérée sans précautions suffisantes sur le plan environnemental. Le biogaz issu du cycle court du carbone vivant présente un bilan tout à fait différent en termes d'émission de CO<sub>2</sub>, qui en fait un vecteur très prometteur de la transition bas carbone.

Depuis 20 ans, les réserves économiquement exploitables de gaz d'origine fossile progressent un peu plus rapidement que celles de pétrole. Elles représentent plus de 50 ans de production, au rythme de 2017. Leur potentiel d'émission équivaut approximativement aux trois quarts des réserves de pétrole, mais est susceptible de les rattraper rapidement, car les investissements dans le gaz fossile ont le vent en poupe. Ces investissements concernent son extraction et ses chaînes de transport, par terre ou par mer, qui démultiplient son utilisation potentielle.

Des considérations géostratégiques bien connues y concourent : le gaz d'origine fossile est une arme que la Russie, détentrice de près d'un cinquième des réserves mondiales, utilise régulièrement pour accroître son influence en Europe ; il est l'un des piliers de la stratégie américaine pour se défaire de sa dépendance à l'égard du Proche-Orient.

Un autre moteur du regain gazier réside dans les stratégies des compagnies pétrolières. Depuis l'époque héroïque de Bakou où jaillissaient les « fontaines d'or noir », l'épopée du pétrole a été

jalonée par les jeux stratégiques des majors pétrolières. Les compagnies pétrolières ont longtemps participé au déni du changement climatique, allant parfois jusqu'à financer des officines chargées de semer le doute sur la réalité du changement climatique.

Dans leur majorité, les compagnies reconnaissent aujourd'hui l'existence du réchauffement global. Sous la pression de la société civile et de leurs actionnaires, elles sont contraintes de diversifier leurs portefeuilles d'activité en mettant des billes dans des sources énergétiques moins ou non carbonées ainsi que dans les activités de capture et de stockage géologique du CO<sub>2</sub>. Chaque compagnie établit sa propre stratégie, en mixant pas mal de communication et ses choix plus ou moins osés de diversification des investissements. Toutes opèrent cependant un recentrage vers le gaz, promu au rang d'« énergie de transition » vers le bas carbone.

Héritière de la scission de la Standard Oil imposée par la Cour suprême des États-Unis en 1911, ExxonMobil reste la première compagnie pétrolière américaine. Son ancien président, Lee Raymond, a été l'un des opposants les plus acharnés au protocole de Kyoto, n'hésitant pas à financer des officines climatosceptiques. En 2019, ExxonMobil reconnaît l'existence du changement climatique, participe à des initiatives censées le combattre et a même soutenu une proposition bipartisane d'instaurer une taxe carbone aux États-Unis. Cela n'empêche nullement la société d'investir massivement dans les fossiles, en privilégiant le gaz. Le groupe n'a pas hésité à mettre sur la table plus de 30 milliards de dollars pour prendre le contrôle de XTO Energy, l'un des leaders du gaz de schiste aux États-Unis. Sous l'impulsion de son nouveau président, Darren Woods, la compagnie projette d'investir plus de 200 milliards de dollars pour remonter d'un quart son extraction de gaz et de pétrole entre 2017 et 2025<sup>16</sup>. Un plan qui a dopé les cours

de l'action en dépit des interpellations répétées des investisseurs institutionnels sur les risques climatiques lors des assemblées générales d'actionnaires. Mais une fois descendus de la tribune, ces gestionnaires d'actifs font leur calcul, car leurs clients réclament des rendements élevés. Or, sitôt que le pétrole et le gaz se renchérissent, les perspectives de profit rebondissent. C'est pourquoi les investisseurs institutionnels ont accru leur présence dans les compagnies pétrolières internationales dont ils détiennent désormais 27 % du capital.

Les compagnies européennes en font généralement un peu plus que Exxon Mobil en termes de diversification des investissements. Total est par exemple présent dans le photovoltaïque, via sa filiale californienne Sunpower spécialisée dans les panneaux à haut rendement. L'activité solaire du groupe est désormais intégrée dans la branche Gas, Renewables & Power dont l'ambition est de développer la production d'électricité bas carbone, à partir de sources renouvelables et de gaz, et d'entrer sur le marché final. En 2018, les résultats de cette division n'ont atteint que 7 % de ceux de la branche exploration-production qui reste le poumon financier du groupe. Mais elle a investi plus de 3,5 milliards de dollars, soit le quart des investissements d'exploration-production, pour se renforcer dans le transport international du gaz, la production d'électricité et sa distribution. Cette stratégie de diversification vise à créer une deuxième filière intégrée permettant à Total de figurer demain parmi les entreprises qui comptent en matière de production et de distribution d'électricité. Un pari audacieux, mais dont les impacts finaux sur le climat dépendront du rythme auquel le groupe parviendra à se défaire du gaz d'origine fossile pour produire l'électricité. La boulimie actuelle des investissements sur le gaz

fossile n'est en effet guère compatible avec les scénarios conduisant à la neutralité carbone avant la fin du siècle.

Une autre compagnie pétrolière européenne est particulièrement active en matière de diversification : Equinor, la compagnie contrôlée par l'État norvégien. Plutôt que de disséquer sa stratégie à partir des chiffres, embarquons sur l'« express côtier » qui va nous permettre de remonter le long des côtes norvégiennes jusqu'au cap Nord.

## **À BORD DE L'« EXPRESS CÔTIER »**

L'« express côtier » (Hurtigruten) est, en Norvège, une véritable institution. En 1893, le Parlement décide de financer une ligne hebdomadaire rattachant Trondheim à Hammerfest situé au-delà du cercle polaire, pour désenclaver le Grand Nord. L'impulsion est donnée. Aujourd'hui, le moyen le plus rapide pour rejoindre le cap Nord est d'emprunter l'avion. Les express côtiers continuent pourtant de sillonner les fjords jusqu'à Kirkenes à la frontière russe.

Embarquons à Bergen, cette ville de près de 300 000 habitants détenant le record européen du nombre de jours de pluie dans l'année. Nous sommes chanceux d'embarquer par un ciel immaculé. Depuis l'express qui quitte l'embarcadère, les façades multicolores des maisons du vieux quartier de Bryggen se détachent le long du quai. Très peu de voitures ici, si ce n'est quelques Teslas souvent équipées d'une plaque de taxi. Depuis 2017, plus d'une voiture neuve sur deux vendue en Norvège fonctionne à l'électricité elle-même produite, à près de 100 %, par des sources non carbonées et non nucléaires. Deux records absolus.

Avant de quitter le port, jetons un dernier regard sur le fond du bassin où se tient le marché au poisson. Nous y avons dégusté un excellent *molge* à base de cabillaud. Contrairement à celui de Terre-

Neuve ou de l'Atlantique, le stock de mer de Barents, soumis à une stricte régulation nationale, se reproduit sans difficulté. Ce souci de protection de la nature semble omniprésent. Sitôt que le temps le permet, les habitants de Bergen se précipitent dans le funiculaire pour parcourir les sentiers qui serpentent entre les montagnes surplombant la ville. Avec ses multiples lacs et ses pentes ombragées, la nature est ici vigoureusement défendue contre les multiples prédateurs qu'elle pourrait subir.

Dans les bassins situés le long du chenal de sortie du port, des navires aux formes étranges attirent l'attention. Leurs proues tombent à pic dans l'eau et d'immenses treuils surplombent leur plateau arrière. Ce sont des remorqueurs géants destinés aux travaux au large. Ils ont été conçus pour participer à la première activité économique du pays : l'extraction d'énergie fossile sous la mer.

L'activité est relativement récente<sup>17</sup>. Elle démarra sur la portion du plateau continental de mer du Nord située au sud de Bergen. Les premières licences d'exploration furent délivrées au milieu des années 1960, suivies de découvertes prometteuses quelques années plus tard. L'exploitation put commencer dès 1971 sur les gisements les plus faciles d'accès, comme celui d'Ekofisk situé à 70-75 m au-dessous du niveau de la mer. Gisement de pétrole dont près de 90 % des réserves ont aujourd'hui été pompées.

Notre bateau a mis le cap vers le nord. Nous remontons un bras de mer le long d'un chapelet d'îles situé à notre gauche. Depuis le pont supérieur, on peut distinguer quelques tours témoignant d'une activité industrielle. Il s'agit des installations de Kollness qui traitent depuis 1996 le gaz naturel provenant du gisement de Troll situé quelque 65 km à l'ouest. Dans cette zone, il faut envoyer le matériel de forage à 300 m sous le niveau de la mer pour commencer à

percer le sol. L'exploitation a commencé plus tardivement qu'au sud. Mais les réserves de pétrole et surtout de gaz y sont plus importantes. Equinor, la principale entreprise pétro-gazière du pays, compte exploiter Troll au moins jusqu'en 2085.

Après une escale aux îles Lofoten, nous franchissons le cercle polaire et pénétrons dans la mer de Barents. Le climat reste tempéré grâce à l'influence du Gulf Stream et la glace n'a qu'exceptionnellement prise sur la mer. En arrivant au port d'Hammerfest, nous repérons un méthanier qui mouille dans la rade, dans l'attente de son tour de chargement sur le terminal de l'île de Melkøya. C'est d'ici qu'est expédié le gaz du gisement de Snøhvit, le premier mis en exploitation en mer de Barents en 2007. Du fait de la météo, de la vigueur des courants et de la plus grande profondeur – il faut opérer jusqu'à 400 m sous la surface de l'eau –, les conditions d'exploitation sont rudes en zone arctique. Le gouvernement norvégien continue pourtant à y octroyer de nouveaux permis d'exploration, comptant sur la richesse du sous-sol en gaz pour contrarier l'épuisement rapide des gisements plus faciles à exploiter au sud du pays.

Nous poursuivons notre périple et arrivons en vue du cap Nord, une immense falaise surplombant l'océan. Nous avons touché la pointe septentrionale du continent européen, mais pas celle de la Norvège. À 960 km devant nous, face au promontoire balayé par les embruns, se trouve l'archipel du Svalbard sous souveraineté norvégienne. Sa principale île, le Spitzberg, compte plus de 2 000 habitants. C'est la recherche du charbon qui constitua le motif principal de son peuplement au début du <sup>xx</sup>e siècle. En 2015, deux mines y étaient encore en exploitation, faisant de la Norvège un (tout petit) exportateur net de charbon. Compte tenu de la baisse des cours et du coût des subventions, le gouvernement semble décidé à



réduire la voilure en limitant la production à la seule fourniture de la centrale électrique locale. C'est bien le moins qu'il puisse faire dans un pays dont le fonds souverain a décidé de revendre tous ses actifs financiers liés à l'activité charbonnière.

Sur la passerelle de débarquement du port de Kirkenes, ultime étape de notre périple, nous songeons à la complexité de la relation de la Norvège à l'énergie fossile. L'engagement du pays face au risque climatique ne laisse aucun doute. Il subventionne massivement le véhicule électrique, investit dans les technologies renouvelables pratiquées offshore, s'affirme comme l'un des leaders incontestés en matière de capture et stockage du CO<sub>2</sub>. Sur le plan financier, c'est l'un des rares bailleurs de fonds à avoir accru ses transferts vers les pays en développement au nom du climat. Simultanément, le pays mène une stratégie de valorisation de sa rente pétro-gazière qui passe par l'exploitation de toutes ses réserves économiquement exploitables. Les déclarations du ministre en charge de l'Énergie interrogé en 2016 sont sans équivoque : « Quand les réserves seront épuisées, nous cesserons de produire. Nous avons déjà extrait un tiers de ces réserves. Nous aurons extrait un deuxième tiers d'ici 20 ans. Nous avons déjà développé un système de gazoducs dans la région arctique, car une grande partie des ressources restantes sera située dans nos territoires les plus au nord<sup>18</sup>. »

La stratégie norvégienne de sortie des fossiles consiste à vider le plateau continental de tout ce qui est économiquement exploitable en réinvestissant la rente pour préparer un futur soutenable. Le pays exporte massivement de l'énergie fossile – il est le troisième exportateur mondial de gaz naturel – pour développer une infrastructure lui permettant d'asseoir son propre système énergétique sur des sources intégralement renouvelables. On sent

même dans les propos du ministre une certaine précipitation : l'énergie fossile doit être extraite rapidement des profondeurs. Un tiers de la réserve totale en 20 ans ! Comme s'il n'allait plus être possible de le faire à plus long terme. Un comportement qui nous rappelle l'avertissement de Sinn et son *Green Paradox* évoqué en début de chapitre.

## **LES ACTIFS ÉCHOUÉS, PREMIER COÛT DE LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE !**

Le jeu des rentes se conjugue aux stratégies des États pour maintenir un flux d'investissement conséquent vers des actifs dédiés à l'extraction des énergies fossiles et à leur utilisation par le système productif et les utilisateurs finaux. Ces actifs sont généralement là pour longtemps : de l'ordre d'une à deux décennies pour les véhicules thermiques, de 30 à 50 ans pour les centrales électriques ou les raffineries, plus de 50 ans pour un réseau de pipelines ou de gazoducs. Beaucoup trop longtemps par rapport au tic-tac de l'horloge climatique !

À mesure que les sociétés avanceront sur la voie de la transition bas carbone, elles devront renoncer à utiliser une partie de ces actifs, bien avant qu'ils soient économiquement ou techniquement amortis. Les économistes utilisent la formule d'« actifs échoués » (« *stranded assets* ») pour qualifier de telles pertes en capital. Une question clé de la transition énergétique est de savoir qui va régler une addition qui continue de croître tant que l'investissement vers les énergies fossiles n'est pas tari. Illustrons le propos par quelques exemples.

Le compromis de sortie du charbon en Allemagne repose sur un engagement financier public très important. La note est si élevée

que cela peut faire douter de la capacité financière de l'État (et des Länder) allemand, pourtant l'un des plus riches au monde. C'est pourquoi l'économiste Ottmar Edenhofer recommande d'utiliser un « prix du CO<sub>2</sub> effectif afin de sécuriser la sortie du charbon<sup>19</sup> ». Utiliser cette méthode réduirait le coût de la sortie du charbon et le distribuerait différemment entre les acteurs : face au renchérissement du CO<sub>2</sub>, les entreprises émettrices seraient obligées de reconvertir rapidement leur outil de production. Avec le produit de la taxe carbone, l'État récupérerait des ressources supplémentaires permettant d'accompagner socialement la transition. Le degré de réussite du programme allemand aura valeur d'exemple au-delà de ses frontières. Les autres pays charbonniers devront reconvertir des parcs de production électrique bien plus jeunes et de plus grande capacité. Le coût de ces reconversions continue de croître tant qu'on ajoute aux parcs existants de nouvelles capacités thermiques.

Pour limiter demain l'empilement d'actifs échoués, une voie pour les entreprises serait d'investir dans les systèmes de CCSU susceptibles de prolonger l'utilisation des énergies fossiles sans plus émettre de CO<sub>2</sub>. En l'absence d'incitations économiques ou réglementaires suffisantes, cette voie risque de se refermer du fait des délais qui seront trop longs pour passer des quelques pilotes en cours d'installation à l'échelle industrielle. Le temps est, ici encore, un paramètre essentiel de la réussite : à tergiverser pendant que tournent les aiguilles de l'horloge climatique, on renonce à des investissements immédiats qui permettraient de réduire demain le coût de la sortie des fossiles.

Les réseaux de transport sont une composante importante des actifs énergétiques. Transporter le pétrole et le gaz coûte cher : plus de 9 milliards de dollars, juste pour doubler la ligne du Trans Montain

raccordant les gisements canadiens de l'Alberta au Pacifique ; dans les 50 milliards pour une ligne complète d'approvisionnement en GNL depuis l'Australie vers le Japon. Une grande partie de ces actifs risque également de s'échouer si on n'agit pas avec anticipation. L'exemple des infrastructures gazières est instructif. En Europe, le maillage des gazoducs est dessiné pour acheminer du gaz fossile importé vers les centres de consommation. Si demain on ne veut plus de gaz fossile, il faudra renoncer à utiliser les tuyaux, sauf si on les reconvertit pour transporter du biogaz. Mais il faut alors dès à présent redessiner une partie du réseau pour faire coïncider les points d'injection avec la production locale du biogaz et inverser demain le sens de la circulation du gaz dans les tuyaux (circulation « à rebours », disent les professionnels).

La problématique des actifs échoués ne concerne pas que le secteur de l'énergie. La bascule en cours vers la voiture électrique en fournit une autre illustration. Après s'être longtemps focalisés sur l'amélioration des véhicules thermiques, les constructeurs automobiles sont contraints de se lancer dans la bataille de l'électrique. En Europe, les implications vont être lourdes. Pour produire le même nombre de véhicules, il faut en moyenne de deux à trois fois moins de main-d'œuvre dans les usines : le moteur électrique est bien plus simple et rapide à monter que le moteur thermique. Fait aggravant, la batterie qui en constitue le principal composant risque d'être importée, au moins au démarrage, d'Asie. Le coût des actifs échoués, c'est aussi celui des restructurations que va provoquer dans tout l'appareil productif le retrait accéléré des fossiles.

Les ménages ne sont pas en reste, car ils détiennent aussi des actifs liés à l'usage d'énergie fossile dont ils vont devoir se débarrasser. Dans un nombre croissant de villes, les municipalités

imposent désormais des zones à basses émissions qui interdisent l'usage des véhicules thermiques. Ces zones préfigurent des régulations plus globales qui vont interdire l'accès des véhicules thermiques aux centres urbains. Pour les ménages de la périphérie qui seront encore dépendants des véhicules thermiques, la mise en place de ces régulations sera très coûteuse. En matière de chauffage, beaucoup sont également dépendants de chaudières fonctionnant au fioul auquel il faudra également renoncer.

La valeur totale de ce « capital fossile » dont une grande partie va s'échouer est difficile à estimer. On connaît mieux le flux d'investissement qui continue de l'irriguer. Au total, l'AIE estime à environ 1 200 milliards de dollars les montants investis chaque année pour développer les infrastructures permettant de produire et distribuer les énergies fossiles. Il faut probablement ajouter un montant comparable pour les investissements situés en aval dans les équipements permettant de les utiliser. À partir de ces évaluations, l'Agence calcule les besoins de financement requis pour accélérer la marche vers la neutralité carbone, en ajoutant des investissements pour le déploiement des renouvelables et l'efficacité énergétique, et en retranchant ceux qu'on peut économiser sur les énergies fossiles. En France, l'I4CE (Institute for Climate Economics) utilise une méthode similaire pour évaluer les besoins de financement de la transition énergétique. Avec cette méthode, il aboutissait en 2018 à la conclusion que « pour atteindre la trajectoire des objectifs nationaux en matière de climat, il manque encore 10 à 30 milliards d'euros d'investissements annuels<sup>20</sup> ».

La limite de ce type de calculs est qu'ils ne portent que sur les flux et négligent le coût des actifs échoués qui s'accroît exponentiellement à mesure que se contracte le budget carbone. Du fait des multiples renoncements face au réchauffement, nos sociétés

accumulent un capital dont il va falloir massivement se débarrasser. Le premier coût de la transition énergétique est bien celui de ce désinvestissement, qui aura de multiples facettes économiques, sociales et culturelles. Quand on leur fournit les bonnes incitations économiques, nos sociétés savent parfaitement financer des investissements supplémentaires. Elles savent beaucoup moins bien désinvestir. Quitter la logique du « toujours plus », c'est une problématique qu'on retrouve dans l'analyse des gains d'efficacité énergétique, l'autre levier de la transition énergétique.

## CHAPITRE 8

# À QUI PROFITENT LES GAINS D'EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE ?

Une inversion historique de l'échelle des coûts de production au profit des renouvelables d'un côté ; des fossiles qui font de la résistance en réinvestissant une grande partie de leurs rentes, de l'autre. Ces forces agissent de façon contradictoire, avec une issue qui ne fait guère de doute : les sources fossiles seront amenées à disparaître du système énergétique. Mais en combien de temps ?

Durant la décennie 2010, le déploiement de nouvelles sources renouvelables s'est opéré dans la continuité du schéma historique de l'empilement décrit au [chapitre 1](#) : elles se sont ajoutées aux sources fossiles sans s'y substituer. La vitesse avec laquelle les terriens pourront échapper à cette logique de l'empilement va dépendre des choix qu'ils feront en matière d'utilisation de l'énergie.

Nous entamons le chapitre par quelques exercices d'arithmétique. Pour passer de la logique de l'empilement à celle de la substitution, il convient de freiner la consommation d'énergie et même de la réduire par habitant. On peut y parvenir de deux façons : renoncer à certains services apportés par l'énergie (par exemple baisser la température de son logement ou le nombre de kilomètres parcourus), ou accroître l'efficacité de son utilisation pour

obtenir les mêmes services (isoler sa maison, utiliser un véhicule consommant moins au km ou pratiquer le covoiturage).

Les scénarios prospectifs visant la neutralité carbone privilégient souvent le recours à l'efficacité énergétique pour réduire la consommation d'énergie. Ce faisant, ils négligent un mécanisme économique de base décrit par l'économiste Stanley Jevons dès le XIX<sup>e</sup> siècle – l'« effet rebond » –, suivant lequel l'efficacité énergétique provoque une baisse du coût pour l'utilisateur qui est incité à accroître sa consommation. Un antidote, proposée par Ernst von Weizsäcker, serait de taxer les gains d'efficacité pour éviter qu'ils ne profitent aux consommateurs<sup>1</sup>.

Le remède proposé soulève plusieurs difficultés. Comme le montrent les exemples du transport aérien, de l'amélioration des systèmes de cuisson ou de l'isolation des bâtiments, les gains d'efficacité énergétique conjugués aux baisses de prix sont aussi un vecteur permettant d'élargir l'accès à des services énergétiques de populations qui en sont privées. Derrière l'effet rebond se cache la question de la distribution des gains d'efficacité énergétique qui peuvent, suivant les politiques conduites, accroître ou diminuer les inégalités d'accès à l'énergie.

Pour hâter la sortie du système fossile, il faudrait d'un côté accroître les investissements d'efficacité énergétique pour améliorer l'accès universel aux services énergétiques, de l'autre lutter contre les effets indésirables de l'effet rebond qui pousse aux consommations superflues. Conjuguer efficacité énergétique pour couvrir les besoins de base et « sobriété énergétique » pour éradiquer le superflu de nos modes de vie. Nous nous interrogeons en conclusion du chapitre sur l'étendue des remises en question qu'implique l'objectif de sobriété énergétique. La redistribution des gains de productivité au profit de ceux qui n'ont pas accès aux



services énergétiques peut-elle s'opérer sans une redistribution plus radicale de la création de richesse dans le monde ?

## UNE ARITHMÉTIQUE DE L'ÉTIQUETTE

Derrière leur complexité reflétant les multiples interactions à prendre en compte, les scénarios de décarbonation du système énergétique peuvent se ramener à la combinaison de trois variables : la quantité d'énergie primaire mobilisée, sa répartition entre sources fossiles et non fossiles, le niveau de consommation par habitant. Pour l'illustrer, nous avons construit trois images du secteur énergétique en 2050 à partir de ces variables ([annexe 2](#))<sup>2</sup>. Chacune de ces images a été associée à une étiquette de couleur à l'instar de celles nous informant de l'efficacité énergétique des équipements ou des logements.

L'étiquette rouge indique la catastrophe annoncée, celle que nous éviterons si nous nous persuadons qu'elle va se produire suivant la thèse de Jean-Pierre Dupuy. Cette image s'inscrit dans le prolongement des tendances passées. Le terrien moyen continue d'augmenter sa consommation d'énergie qui atteint l'équivalent de 2 tonnes de pétrole en 2050. Les sources carbonées, du fait de la résistance du charbon et de l'envolée du gaz d'origine fossile, fournissent encore les trois quarts de l'énergie. Les énergies renouvelables qui ont progressé plus rapidement que toutes les autres sources se sont ajoutées aux fossiles sans s'y substituer ! Dans l'étiquette rouge, les émissions de CO<sub>2</sub> augmentent d'un quart entre 2015 et 2050. Le monde épuise le budget carbone global (pour viser 2 °C) en moins de 20 ans, ce qui nous conduit vers un réchauffement de l'ordre de 4 °C à la fin du siècle.

L'étiquette jaune décrit le système énergétique auquel conduit l'application de l'accord de Paris, dans l'hypothèse optimiste où les gouvernements mettent en place les moyens requis pour faire face à leurs engagements. Le terrien moyen stabilise sa consommation d'énergie entre 2015 et 2050. C'est une rupture relativement aux tendances séculaires de l'empilement, qui résulte d'une utilisation plus efficace de l'énergie. En 2050, les transports terrestres se sont affranchis de leur addiction au pétrole, mais les énergies fossiles représentent encore la moitié de l'énergie utilisée. Dans le monde en jaune, les émissions de CO<sub>2</sub> d'origine énergétique diminuent de près de 30 % entre 2015 et 2050, mais leur cumul provoque un dépassement de l'ordre de 40 % du « budget carbone ». Cela mène à un réchauffement se situant quelque part dans la fourchette 2 °C à 4 °C à la fin du siècle.

À l'opposé du rouge, l'étiquette verte : celle de l'accélération de la transition bas carbone. En 2050, les utilisations énergétiques du pétrole sont devenues un sous-produit de ses usages chimiques. Celles de charbon et à un moindre degré de gaz ont fortement reflué. Leur substitution par des sources non carbonées a été facilitée par le recul de la consommation d'énergie par habitant : le terrien moyen consomme à peine plus d'1 tonne d'équivalent pétrole. Avec l'étiquette verte, les émissions de CO<sub>2</sub> sont divisées par quatre entre 2015 et 2050. Le cumul des émissions épuise pratiquement le « budget carbone ». Pour circonscrire totalement le risque d'un réchauffement supérieur à 2 °C, il faudrait passer à un régime d'émissions négatives avant la fin du siècle avec des émissions brutes inférieures à la quantité de CO<sub>2</sub> stockée par les puits de carbone.

Rouge, jaune, vert ? Comme pour les étiquettes nous informant des performances énergétiques des matériels dans les rayons des

magasins, la couleur des scénarios dépend en premier lieu de l'évolution de la consommation d'énergie par habitant : en hausse dans le monde en rouge, stable avec l'étiquette jaune, en baisse dans le monde en vert. Mais comment passer du rouge au vert ? De multiples scénarios sont possibles, comme le révèle l'arithmétique de la consommation d'énergie.

La consommation totale d'énergie par habitant varie considérablement d'un pays à l'autre. Au sein des pays développés, elle dépassait en 2016 l'équivalent de 4 tonnes de pétrole par habitant en moyenne (7,7 au Canada et 6,7 aux États-Unis, mais 3,2 dans l'Union européenne). Dans ces pays, le pic de consommation énergétique par habitant semble avoir été atteint dans les années 2000, avant la récession de 2008. En Chine, cette consommation atteint 2,1 tonnes d'équivalent pétrole, soit un peu plus que la moyenne mondiale (1,85). Dans le reste du monde, chaque habitant utilise en moyenne moins d'1 tonne : 0,65 en Inde malgré la croissance très forte observée sur la période récente, à peu près autant sur l'ensemble du continent africain, mais généralement moins d'une ½ tonne quand on habite au sud du Sahara (hors Afrique du Sud).

D'ici 2050, l'essentiel de la croissance démographique devrait s'opérer dans les pays où la consommation d'énergie est inférieure à 1 tonne d'équivalent pétrole par habitant. L'arithmétique de base révèle en premier lieu que si ces pays effectuent par mimétisme un rattrapage rapide des modes de consommation des pays développés, c'est plutôt un retour vers l'étiquette rouge qui est à craindre. C'est en suivant une telle dynamique durant la décennie 2000 que la Chine est devenue le premier émetteur de CO<sub>2</sub> au monde. En revanche, si on réduit suffisamment les consommations par habitant des pays riches, il devrait être possible d'utiliser les

gains d'efficacité énergétique pour faciliter l'accès à l'énergie des pays pauvres, tout en réduisant fortement les émissions globales. Mais cela suppose que l'efficacité énergétique se traduise bien par un repli de la consommation d'énergie par habitant des pays riches, ce qui n'a pas été le cas dans le passé.

## **EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE ET EFFET REBOND**

En 1865, Stanley Jevons publie son fameux essai sur le charbon. L'industrie britannique a pris une avance considérable sur ses concurrentes européennes, grâce aux gains de productivité résultant du couplage entre la machine à vapeur inventée un siècle plus tôt et le charbon dont le Royaume-Uni est alors le premier producteur mondial. Jevons observe que les progrès techniques ont permis de réduire de deux tiers la quantité de charbon nécessaire à la production d'acier entre 1830 et 1863. L'effet de ces gains d'efficacité n'a pas été de réduire la consommation du minerai comme s'y attendaient les ingénieurs, mais de multiplier par dix la consommation de charbon. D'où son observation : « C'est une totale confusion des idées de supposer que l'utilisation économique du combustible équivaut à diminuer sa consommation. L'exact opposé est la vérité<sup>3</sup>. »

Ce faisant, Jevons définit le premier ce que les économistes de l'environnement appellent aujourd'hui l'« effet rebond ». Les gains d'efficacité dans la production ou l'utilisation de l'énergie se traduisent par une baisse du coût de son utilisation. L'utilisateur est alors incité à en consommer plus. Ce type d'effet est parfois difficile à déceler à court terme, car une bonne partie de nos consommations énergétiques sont contraintes. À long terme, il joue un rôle majeur de diffusion de la consommation d'énergie via la

baisse des prix relatifs, comme l'a montré l'exemple de la lumière ([chapitre 1](#)).

L'effet rebond a une composante directe, via l'élasticité-prix de la demande du bien concerné. Si cette élasticité est supérieure à l'unité, la consommation du bien considéré augmente à la suite des gains d'efficacité en amont. C'était le cas du charbon dans les premières heures de son développement, comme l'a fort bien montré Jevons. Un effet comparable a été observé aux États-Unis après la mise en place au début des années 1960 des premières normes imposant aux constructeurs automobiles de limiter la voracité de leurs voitures. Les gains visés grâce à l'efficacité des véhicules ont été plus que mangés par l'augmentation du nombre de kilomètres parcourus (et plus tard par le détournement de la réglementation via le développement de véhicules utilitaires légers non soumis aux mêmes normes).

L'ampleur exacte de l'effet rebond a fait l'objet de longues discussions entre économistes de l'environnement. À la suite de Amory Lovins, on considère que le rebond potentiel des consommations d'énergie est freiné par des effets de saturation quand on atteint un certain niveau de revenu<sup>4</sup>. Mais le seuil de saturation peut être plus ou moins élevé suivant les cas, comme le montrent les écarts importants de consommation d'énergie par tête, pour des niveaux équivalents de revenus.

Ce seuil de saturation peut également être relevé sous l'impact de l'effet rebond indirect qui joue via l'élasticité-revenu. À consommation directe d'énergie inchangée, l'amélioration des normes thermiques du bâtiment ou l'utilisation d'une chaudière plus performante réduisent la facture énergétique d'un ménage. Cela libère du pouvoir d'achat pour d'autres biens et services, comme par exemple partir plus loin en vacances ou acheter plus de biens

durables. La production de ces biens va elle-même requérir de l'énergie. Sur le plan macroéconomique, il faut naturellement tenir compte de cette consommation d'énergie indirecte, souvent dénommée « énergie grise », qui peut apparaître dans les nouveaux centres manufacturiers situés très loin du consommateur. Cet effet rebond indirect est moins visible, mais peut être encore plus important que l'effet rebond direct dans la dynamique des économies contemporaines.

Si l'effet rebond est omniprésent, c'est qu'il est une illustration particulière d'un mécanisme économique intrinsèque au système capitaliste : l'élargissement des marchés de masse par la baisse des prix relatifs. Ce mécanisme analysé par Fouquet dans le cas de la lumière ([chapitre 1](#)) est renforcé par la numérisation de l'économie qui exerce une pression sur les prix et les marges. D'un côté, la digitalisation accroît les potentiels d'efficacité énergétique par ses multiples applications en matière d'économie d'énergie ; de l'autre, elle renforce l'effet rebond en accélérant la baisse des prix relatifs des biens et services produits avec une meilleure efficacité énergétique.

Dans les scénarios prospectifs décrivant l'avenir du système énergétique, l'efficacité énergétique joue souvent un rôle déterminant sitôt qu'il s'agit de décarboner rapidement l'économie, sans que les modèles prennent clairement en compte le mécanisme économique de l'effet rebond. En la matière, les scénarios les plus complets sont ceux présentés chaque année par l'AIE. Étant construits à croissance économique inchangée, l'accélération des gains d'efficacité énergétique y est particulièrement vertueuse : elle permet d'obtenir les mêmes volumes de production en freinant les besoins d'énergie et les émissions de CO<sub>2</sub> qui leur sont associés. L'Agence estime ainsi que les gains d'efficacité énergétique

devraient être le premier moteur de la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> au cours des prochaines décennies.

Ce faisant, elle sous-estime grandement l'effet rebond qui a tendance à rejaillir sitôt que le prix des énergies diminue ou que la croissance s'accélère, comme en 2017 et 2018. Dans son diagnostic, l'Agence le reconnaît du reste explicitement : « Le ralentissement progressif de l'efficacité énergétique depuis 2015 est en fort contraste avec l'accélération requise par le scénario de décarbonation de l'Agence<sup>5</sup>. »

## **TAXER LES GAINS D'EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE ?**

Ernst von Weizsäcker, fondateur du Wuppertal Institut, est un des premiers économistes à avoir creusé la question de l'efficacité énergétique. Dans son ouvrage *Facteur cinq*, il souligne combien les gains de productivité ont conduit durant le xx<sup>e</sup> siècle à une baisse du prix de l'énergie et des matières premières relativement à celui des autres facteurs de production. Il y voit une cause primordiale de la surexploitation des ressources. Sa thèse est que, dans le cadre des techniques connues, des changements d'organisation et de régulation économique pourraient permettre de diviser par cinq l'usage des ressources, au premier rang desquelles l'énergie.

Pour y parvenir, il convient cependant de contrer l'effet rebond qui agit sitôt que les gains de productivité se transmettent en aval via la baisse des prix. Pour contrer cet effet, Von Weizsäcker suggère une réforme fiscale radicale. Écoutons-le : « Nous proposons d'accroître les prix de l'énergie et des autres matières d'un pourcentage équivalent à celui des gains de productivité réalisés sur l'énergie et les ressources l'année précédente. L'ajustement s'effectuerait à l'aide d'une taxe et devrait entrer en vigueur un mois

après la publication des données sur les gains de productivité sur l'énergie et les ressources<sup>6</sup>. » L'auteur ajoute que ce délai annuel pourrait être modulé pour tenir compte des cycles électoraux ou de celui des plans quinquennaux en Chine.

La proposition est séduisante. Elle prévoit une indexation de l'énergie sur les gains de productivité qui prémunirait à l'avenir contre toute baisse de son prix relatif provoqué par les gains d'efficacité. Ce sont donc les gouvernements qui empocheraient ces gains, ce qui leur donnerait au passage des ressources supplémentaires pour accompagner la transition énergétique.

Malgré son attrait, la proposition comporte certaines faiblesses. Sur le plan technique, sa faisabilité implique de disposer des données permettant de déterminer chaque année une assiette fiscale indiscutable mesurant les gains de productivité. Même pour l'énergie qui est probablement la ressource la mieux documentée, ces données ne sont pas évidentes à mobiliser. Bien plus difficiles à réunir, par exemple, que les tonnes de CO<sub>2</sub> émises par la combustion des fossiles qui constituent une assiette fiscale plus robuste.

Sous l'angle économique, comme le montre Fouquet dans le cas de la lumière ([chapitre 1](#)), la plus grande partie des gains d'efficacité énergétique n'apparaît pas au niveau de la production d'énergie, mais lors de son utilisation grâce à des équipements de plus en plus performants qui permettent de la convertir en énergie utile (l'ampoule électrique, la chaudière du bâtiment, le moteur des véhicules, etc.). Ces gains n'apparaissent pas dans le prix des énergies (le prix du litre d'essence), mais dans la valeur du service rendu (le nombre de km parcourus). À supposer qu'on puisse la mettre en œuvre, la proposition de Von Weizsäcker axée sur le prix



de la ressource ne corrigerait qu'une part minoritaire et déclinante de l'effet rebond.

Il y a enfin un risque que la taxation des gains d'efficacité réduise les incitations des entreprises à innover et investir pour accroître la productivité. Une incitation plutôt contreproductive et contraire aux intentions de l'auteur de la proposition. La réforme fiscale proposée ne vise pas à freiner le rythme des gains d'efficacité, mais à permettre à l'État de capter leurs bénéfices pour empêcher qu'ils ne se transmettent aux consommateurs via la baisse des prix en stimulant la consommation d'énergie.

L'enseignement principal de l'approche de Von Weizsäcker est que derrière la mécanique de l'effet rebond se pose une question centrale : à qui profitent les gains d'efficacité énergétique ? Si ces gains se distribuent spontanément suivant les règles du marché, ils finissent par se transmettre en aval en stimulant des consommations qui peuvent être socialement souhaitables ou pas. S'il s'agit d'ouvrir l'accès à l'énergie à des personnes qui en sont privées, l'effet rebond est socialement souhaitable. S'il stimule des consommations superflues, il devient un obstacle à la transition bas carbone. Toute la difficulté est de s'accorder sur les normes permettant d'établir la frontière entre le souhaitable et le non-souhaitable sous l'angle de la collectivité. Dans certains cas, cela paraît évident. Dans d'autres, cela pose de sérieux dilemmes. Illustrons le point par trois cas de figure : le transport aérien, l'efficacité énergétique des modes de cuisson, la rénovation thermique des bâtiments.

## **FAUT-IL RATIONNER LE TRANSPORT AÉRIEN ?**

Le transport est l'un des domaines où s'illustre particulièrement bien l'effet rebond. Dans le transport terrestre, les voitures que nous

conduisons aujourd'hui présentent des performances énergétiques incomparables avec celles de nos parents ou grands-parents. On consomme nettement moins de carburant au kilomètre. Mais le nombre de kilomètres parcourus est bien plus élevé, car la voiture a été rendue accessible au plus grand nombre dans les pays développés. La baisse du prix relatif de son usage a joué un rôle majeur dans cette transformation. Elle a gommé, sur le moyen terme, l'impact des chocs pétroliers qui ont parfois donné l'impression contraire. Dans son ouvrage clé sur la mobilité, Yves Crozet estime par exemple que le nombre de kilomètres pouvant être parcourus en voiture par une personne payée au salaire minimum en France a été multiplié par quatre entre 1970 et 2015<sup>7</sup>.

Le transport aérien n'est pas en reste. Comme pour les autres modes de transport collectif, son trafic se mesure en passagers-kilomètres. Le nombre de passagers-kilomètres augmente fortement dans le monde. Sa croissance s'est infléchie dans les pays riches, mais s'est emballée dans les pays émergents. Au total, le trafic aérien double à peu près tous les 15 ans, une tendance que l'Organisation de l'aviation civile internationale comme les deux grands avionneurs Airbus et Boeing voient se prolonger durant les prochaines décennies.

Le dynamisme du transport aérien repose sur des gains de productivité qui ont été accélérés par l'éclosion des compagnies low cost qui ont fait chuter le prix des billets pour les voyageurs. Cela a notamment concerné le carburant, deuxième poste de charge du compte d'exploitation des compagnies. On transporte aujourd'hui les voyageurs en utilisant beaucoup moins de carburant au kilomètre. Comme il n'y a pas eu de changement dans la composition du carburant, ces gains se reflètent dans les émissions de CO<sub>2</sub>. En moyenne, un voyageur sur les lignes internationales émettait de

l'ordre de 180 g de CO<sub>2</sub> par kilomètre parcouru en 1990. En 2017, ce chiffre était tombé à 100 g et devrait se situer entre 80 et 90 g en 2020. Une division par deux en 30 ans qui reflète les améliorations techniques apportées aux avions (motorisation, allègement des matériaux et aérodynamisme) et l'amélioration de leur taux d'occupation.

Ce ne sont pas les grammes de CO<sub>2</sub> par passager-kilomètre qui réchauffent la Planète, mais sa quantité totale rejetée dans l'atmosphère. Comme le trafic aérien international a quadruplé depuis 1990, les émissions de CO<sub>2</sub> en résultant ont doublé sur la même période. Les gains d'efficacité énergétique qui ont favorisé l'accroissement du trafic n'ont pu en absorber que la moitié. Du coup, les rejets de CO<sub>2</sub> par l'aviation civile internationale progressent très rapidement. En 2018, ils ont compté pour plus de 2,5 % des émissions mondiales et pourraient avoisiner 4 % en 2035. Un effet rebond magistral, pas facile à contenir.

Comme on l'a vu au [chapitre 5](#), la régulation mise en place dans le cadre de l'Organisation de l'aviation civile internationale permet la poursuite d'un tel schéma d'ici 2050. Les compagnies aériennes pourront accroître les émissions de CO<sub>2</sub> autant qu'elles le voudront, à condition de les compenser, à partir de 2022, dans le cadre du mécanisme CORSIA. Le système incitera néanmoins les compagnies à accélérer leurs gains d'efficacité énergétique et la recherche d'énergie de substitution si le coût de la compensation est élevé. Pour aller plus loin, on peut imaginer deux types de rupture.

La première serait de miser plus sur la substitution énergétique. Malgré les prouesses de Bertrand Piccard et André Borschberg qui ont fait le tour du monde à bord de Solar Impulse, un avion entièrement solaire, on ne peut pas compter sur ce type de solution d'ici 2050. Le déploiement à grande échelle de l'avion solaire, s'il se

produit un jour, interviendra plus tardivement que celui des voitures particulières. En revanche, il est techniquement possible d'incorporer des quantités croissantes de biocarburants qui pourraient graduellement économiser l'usage du kérosène. C'est la solution privilégiée par les experts de l'AIE, car elle permet de prolonger une croissance forte des trafics. Un tel mouvement de bascule renchérirait cependant les vols, car l'incorporation de bioénergies a un coût<sup>8</sup>. C'est la raison pour laquelle les compagnies ne s'y engagent que timidement en l'absence d'incitations réglementaires contraignantes et/ou de tarification de leur externalité climatique.

Une régulation qui renchérirait le coût des transports aériens inciterait au report vers d'autres modes de transport quand cela est possible (principalement les courts et moyens courriers) ou tout simplement à réduire l'usage de l'avion en se déplaçant moins. De telles pratiques sont de plus en plus recommandées par les organisations environnementales au sein desquelles fleurissent les propositions pour taxer ce mode de transport qui conserve une connotation de transport de luxe, apportant des services superflus dont la société pourrait se passer. Et de fait, si on veut faciliter la mobilité des terriens les moins favorisés, ce n'est certainement pas sur la diffusion du transport aérien qu'il faut miser.

Pour autant, ce ne sont pas les plus riches qui pâtiraient le plus d'actions fortes visant à limiter l'usage de l'avion. Voyager dans les airs a été longtemps un privilège réservé à une petite élite. En 1950, les avions ont par exemple transporté moins de 100 000 passagers dans le monde. Depuis 1950, les lignes aériennes se sont multipliées. Les compagnies aériennes transportent désormais plus de 4 milliards de passagers par an : à chaque seconde, un peu plus de 120 passagers embarquent dans un avion quelque part dans le monde. Si les tendances se poursuivent, ce chiffre devrait passer à

8 milliards en 2035 et 16 milliards en 2050. Cette massification du transport aérien permet à un nombre croissant de personnes issues des classes moyennes d'accéder à ce type de transport. L'effet rebond a d'abord profité à celles des pays développés et joue désormais à plein dans les pays émergents, Chine aux premiers rangs.

Si on restreint l'accès au transport aérien en accroissant son coût ou en réglementant son usage, ce seront ces classes moyennes qui seront les premières affectées, car elles ont été les principales bénéficiaires de l'effet rebond. Les riches conserveront le privilège de pouvoir se déplacer beaucoup plus vite qu'à terre, et donc de pouvoir manger les kilomètres. Pour éviter de tels impacts socialement indésirables, il faudrait mettre en place un système de rationnement permettant de répartir équitablement la rarefaction des sièges disponibles pour se déplacer. Ou imaginer une modification radicale du fonctionnement de nos sociétés avec d'autres règles de partage des revenus et de leur usage pour la consommation.

Le transport aérien nous rappelle que l'effet rebond a favorisé la diffusion de biens ou de services initialement réservés aux riches dans des couches bien plus larges de la population. Le succès du capitalisme a même historiquement reposé sur cette capacité à massifier l'usage de tels biens et services. Laisser jouer l'effet rebond dans le futur hypothèque la possibilité d'infléchir suffisamment les émissions de CO<sub>2</sub> du transport aérien. Mais mettre en place des instruments renchérisant ou restreignant l'usage de l'avion sans actions correctrices aura de réelles implications sur l'équité sociale. L'expérience montre qu'il est préférable de les anticiper.

Ce type de dilemme n'a aucune commune mesure avec une autre problématique d'efficacité énergétique concernant un service

essentiel auquel n'ont pas accès environ 2,5 milliards de terriens : un système de cuisson efficace limitant les pertes énergétiques lors de son utilisation et les dommages sanitaires qui leur sont associés.

## **AMÉLIORER L'EFFICACITÉ DES SYSTÈMES DE CUISSON**

Si la biomasse demeure la première source d'énergie utilisée dans le monde après les fossiles, cela est principalement dû à son utilisation pour cuire les aliments. Son autre grand usage traditionnel est l'alimentation des animaux de trait pour le travail des champs et le transport de matériaux qui n'est pas inclus dans les bilans énergétiques de l'AIE. D'après les agences de l'ONU<sup>9</sup>, environ 2,5 milliards de personnes dépendent de la biomasse traditionnelle pour cuire leurs aliments. Entre 2000 et 2015, leur nombre s'est accru de 400 millions. En Afrique au sud du Sahara, il a augmenté plus rapidement que la population totale. Ces modes de cuisson constituent, de très loin, la pollution de l'air la plus ravageuse de la Planète, à l'origine chaque année du décès prématuré d'environ 4 millions de personnes : enfants, femmes et vieillards principalement.

La contamination des personnes résulte de l'inefficacité énergétique du système. Dans ses formes les plus traditionnelles, un ustensile de cuisson en céramique ou en métal est posé sur un foyer constitué de trois pierres. Ce foyer peut être remplacé par un trépied métallique, plus facilement déplaçable, en dessous duquel la combustion s'opère à l'air libre. Sans système de protection, les fumées se disséminent et intoxiquent leur environnement. La biomasse est utilisée brute ou sous forme de charbon de bois qui en facilite le stockage et améliore marginalement le rendement du système. L'efficacité énergétique de ces modes de cuisson se situe

en moyenne entre 10 et 20 % suivant les régions. Lorsqu'on utilise du charbon de bois, la fourchette atteint 16 à 24 %. Un gain trop faible pour modifier significativement les dommages sanitaires encourus.

Les gains d'efficacité énergétique peuvent être obtenus par deux voies : améliorer le système de combustion ou basculer sur une autre source d'énergie. Une première barrière à leur adoption est souvent culturelle. Les modes de cuisson traditionnels, notamment les foyers « trois pierres », sont souvent associés à des représentations symboliques, voire religieuses, qui freinent le passage à des modes alternatifs. On voit ici le rôle crucial d'une information fiable, relayée par les premiers adopteurs des innovations, dans la diffusion de l'efficacité énergétique. Un point développé avec perspicacité par Édouard Civel dans ses travaux de recherche à la Chaire Économie du Climat<sup>10</sup>. Mais les considérations économiques plus classiques ne sont pas en reste.

En Afrique, au sud du Sahara, la fabrication artisanale de fours améliorés, produits par les villageois à partir de matériaux locaux (argile, paille et bois principalement), requiert une à deux journées de travail et permet d'améliorer de 20 à 30 % l'efficacité des foyers « trois pierres ». Leur durée de vie ne dépasse généralement pas un an. L'utilisation du métal permet d'utiliser des chambres de combustion fermées, ce qui accroît de 45 à 70 % le rendement des foyers traditionnels. Pour les familles, cela représente un investissement de l'ordre de 30 à 50 dollars. Le retour sur investissement est la réduction du temps requis pour se procurer la matière première généralement prélevée gratuitement sur le milieu et, dans certains cas, la réduction de son coût d'achat (ou la possibilité de revendre une partie de celle prélevée). Peu de familles peuvent financer un tel investissement. Le retour sanitaire de ces

foyers améliorés est difficile à estimer en conditions réelles. Le consensus est qu'il est impossible d'atteindre les normes de l'Organisation mondiale de la santé par cette voie. Pour y parvenir, il faut ajouter des équipements de ventilation de la chambre de combustion et de systèmes d'évacuation des fumées. On obtient alors un « four biomasse à haute performance » dont le coût d'acquisition est de l'ordre de 50 à 65 dollars.

L'autre voie d'amélioration consiste à changer le combustible en évitant le charbon et surtout le kérosène qui a, dans le passé, fait l'objet de programmes subventionnés dans certains pays (Inde, Indonésie, Nigeria) malgré ses dommages sanitaires. L'efficacité énergétique des systèmes de cuisson est alors plus que doublée relativement aux systèmes traditionnels à base de biomasse. Mais leur usage provoque un effet de report sur d'autres énergies. L'électricité qui supprime toute pollution domestique est une voie possible en ville quand les réseaux de distribution le permettent. Suivant le mode de production de cette électricité, l'effet de report atteindra, ou non, les fossiles. Les pays ayant obtenu les résultats les plus rapides (Indonésie et Chine en particulier) sont passés par le gaz, notamment le propane et le butane distribués en bouteilles. Leur combustion rejette du CO<sub>2</sub>, mais pratiquement aucun polluant local. L'investissement requis, de l'ordre de 35 à 40 dollars, est moins élevé que pour basculer vers des fours à biomasse à haute performance, mais il faut ensuite pouvoir acheter le gaz. En Afrique au sud du Sahara, cette voie progresse plus rapidement en ville que dans les campagnes, en dépit de programmes ambitieux au Ghana, au Nigeria et au Cameroun.

À beaucoup d'égards, la voie du biogaz serait plus intéressante dans les campagnes mal raccordées aux réseaux de transport. Il convient donc de la privilégier chaque fois que cela est possible.



Mais son déploiement à grande échelle prend plus de temps. Elle se heurte à de nombreux obstacles organisationnels. Sur le plan financier, l'investissement dans les digesteurs fait monter le coût de l'investissement initial au-dessus de 700 dollars. Miser sur le biogaz à la place du fossile conduirait à retarder la généralisation de l'accès à des systèmes sécurisés de cuisson. C'est pourquoi, même dans les scénarios de décarbonation les plus ambitieux, l'amélioration de l'efficacité énergétique des modes de cuisson, priorité sanitaire d'ordre numéro un, passe le plus souvent par une diffusion d'équipements modernes utilisant du gaz d'origine fossile.

L'amélioration de l'efficacité énergétique des systèmes de cuisson dans les pays moins avancés donne un deuxième éclairage sur l'enjeu de la distribution des gains d'efficacité énergétique. Il s'agit de rendre accessible un service énergétique de première nécessité aux plus démunis en réduisant les dommages sanitaires qu'ils subissent. Les solutions les plus rapides provoquent souvent un effet de substitution de la biomasse traditionnelle vers le gaz fossile. Il s'agit d'un effet de report, équivalent à un effet de rebond si on ne considère que les énergies fossiles.

Cela pose un dilemme que quantifie Shonali Pachauri et ses coauteurs dans le cas de l'Asie du Sud<sup>11</sup>. Leur étude montre que les programmes d'amélioration des systèmes de cuisson coûteront plus chers aux pays qui les mettent en œuvre dans les scénarios de décarbonation rapide du fait du renchérissement des énergies fossiles. Elle souligne que ces surcoûts restent bien inférieurs aux bénéfices qu'ils procurent aux populations concernées. Le jusqu'au-boutisme écologiste conduirait à retarder l'atteinte d'objectifs difficilement discutables sous l'angle de l'intérêt général en proscrivant toute injection de fossile. L'effet de rebond induit sur les émissions de CO<sub>2</sub> est cependant limité. Si les 2,5 milliards de

terriens privés d'accès aux moyens sécurisés de cuisson adoptaient tous un système utilisant du gaz d'origine fossile, cela provoquerait des rejets de l'ordre de 110 millions de tonnes de CO<sub>2</sub> par an. Moins de 0,5 % des émissions mondiales de CO<sub>2</sub> de l'année 2018. Peut-on renoncer aux bénéfices immédiats des gains d'efficacité des systèmes de cuisson au nom de l'urgence climatique ?

## **LA RÉNOVATION THERMIQUE DES BÂTIMENTS**

La cuisson des aliments est l'une des multiples façons d'utiliser l'énergie dans l'habitat. Si on agrège tous ces usages, on s'aperçoit que l'habitat constitue le premier poste de consommation d'énergie finale dans le monde, devant celle requise pour faire tourner les usines ou se transporter. Les modes de consommation de cette énergie domestique, et les problématiques associées, présentent une extraordinaire hétérogénéité de situations suivant les contextes.

Dans les pays du Nord, les systèmes de cuisson constituent une fraction déclinante de l'énergie utilisée dans la maison (moins de 8 % en France). Les ménages consomment l'énergie en premier lieu pour le chauffage de la maison et de l'eau qu'on y utilise, et de plus en plus pour le fonctionnement des appareils ménagers et électroniques qui ont envahi notre quotidien. Dans ces pays, les politiques d'efficacité énergétique ont pour cible principale la réduction de la consommation d'énergie utilisée pour le chauffage de la maison et de l'eau domestique.

Dans le cas des logements neufs, ces politiques reposent généralement sur des normes thermiques minimales à respecter lors de la construction des bâtiments. Grâce à ces normes, la performance thermique des immeubles ou maisons récentes est généralement très supérieure à celle des logements anciens. Mais

les logements neufs livrés chaque année ne représentent qu'une modeste fraction du parc. En France, l'Insee estime à 36 millions le nombre de logements, dont un peu moins de 30 millions au titre de la résidence principale. Les mises en chantier de logements neufs oscillent de leur côté entre 350 et 450 000 par an, soit à peine plus d'1 % du parc. Cela signifie qu'il faudrait près d'un siècle de production à ce rythme pour rejoindre le niveau du parc actuel ! C'est pourquoi il faut améliorer l'efficacité thermique des logements anciens si on veut réduire dans les temps les émissions de CO<sub>2</sub> du secteur résidentiel.

Sur le papier, nombre d'opérations de rénovations énergétiques peuvent être amorties en quelques années, voire une ou deux décennies, par les économies réalisées sur les factures énergétiques. Pourtant, les ménages ou les autres propriétaires des logements ne se lancent généralement pas dans ces opérations « rentables sur le papier ». Dans un article fameux<sup>12</sup>, Jaffe et Stavins ont tenté d'expliquer ce décalage par les barrières informationnelles et les imperfections du marché des capitaux qui n'arrive guère à mobiliser des financements longs vers les investisseurs individuels et encore moins à incorporer la valeur associée à la réduction des émissions de CO<sub>2</sub>. C'est pour avoir sous-estimé ce type de barrière que la politique française qui vise depuis plus d'une décennie à accélérer le rythme de rénovation des logements ne parvient pas à atteindre ses objectifs, notamment celui des 500 000 rénovations lourdes annuelles.

Une deuxième déconvenue apparaît généralement une fois les opérations réalisées : seule une partie des économies initialement escomptées se matérialisent en raison de l'effet rebond. Une étude récente portant sur le gaz indique par exemple que dans le cas français les gains d'efficacité sur les chaudières se traduisent à

hauteur de 60 % par des achats supplémentaires de gaz et pour seulement 40 % par une réduction de sa consommation<sup>13</sup>. Une sacrée perte en ligne, qu'il vaut mieux intégrer au moment du lancement des politiques d'efficacité énergétique.

Ici encore, la question sous-jacente est bien celle de la redistribution des gains d'efficacité énergétique. Ceci joue à court terme comme à long terme.

Sur les 30 millions de logements utilisés comme résidence principale, on estime que 15 millions (ceux construits avant 1974) ont besoin d'une rénovation thermique, dont 7 à 8 millions, les « passoires thermiques » suivant l'expression consacrée, d'une rénovation très lourde. Un grand nombre des occupants de ces passoires thermiques font partie des ménages en situation de précarité énergétique. Dans ce genre de situation, le choix est souvent entre rationner ses dépenses de chauffage au détriment du bien-être, voire de la santé, des occupants, ou leur laisser prendre une telle place dans le budget familial que d'autres dépenses, comme celles d'éducation ou de santé, doivent être restreintes.

Les ménages en situation de précarité énergétique regroupaient un peu moins de 7 millions de personnes en 2017<sup>14</sup>. Ces ménages sont très sensibles à toute variation du coût de l'énergie. Quand le prix de l'énergie baisse pour des raisons extérieures, comme entre 2013 et 2017 avec le contrechoc pétrolier, leur nombre diminue. Quand des gains d'efficacité énergétique permettent de réduire le coût de la facture énergétique, une partie, voire la totalité du gain, est immédiatement utilisée par ces ménages pour assurer de meilleures conditions de chauffage aux occupants du logement. L'effet rebond est alors socialement souhaitable et apporte des bénéfices immédiats. *A contrario*, les gains d'efficacité énergétique

peuvent être utilisés pour utiliser l'énergie de façon laxiste ou ostentatoire. L'effet rebond doit alors être combattu.

À long terme, l'effet rebond joue également dans le secteur du logement via la taille moyenne des logements. Sauf pour une minorité de ménages militants, l'efficacité énergétique du logement n'est pas une fin en soi. En revanche, la recherche du confort (et de la sécurité) est un objectif majeur que beaucoup de ménages visent en cherchant à accroître le nombre de m<sup>2</sup> dont ils disposent aux différentes étapes de leur cycle de vie. Dans les pays vieillissants, la dynamique du marché immobilier illustre bien le phénomène : les générations entrantes ont toutes les peines du monde à trouver des logements spacieux quand celles qui se sont installées 30 ou 50 ans auparavant s'accrochent à des logements souvent devenus surdimensionnés. Dans son analyse de l'évolution rétrospective des émissions de CO<sub>2</sub> du parc de logements en France, Jérémie El Beze illustre parfaitement le phénomène : les gains d'efficacité énergétique ont joué à la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> par m<sup>2</sup> occupé depuis 1990. Leur impact sur les émissions totales a été gommé par le comportement des ménages qui ont accru durant la période le nombre de m<sup>2</sup> utilisé par habitant : du fait de la décohabitation, le nombre moyen de personnes par logement a fortement reculé, alors même que la surface moyenne de chaque logement a augmenté <sup>15</sup>.

L'analyse de l'efficacité énergétique des logements renforce les diagnostics posés à partir de l'observation du transport aérien et des systèmes de cuisson. L'effet rebond facilite l'accès à des services énergétiques de base pour des populations qui en sont privées, mais stimule l'augmentation de consommations de confort aux bénéfices discutables quand il faut diriger la société vers la neutralité carbone. Établir une frontière entre les premières et les secondes dépend des

normes socialement acceptées qui peuvent varier considérablement suivant les contextes. La distinction entre sobriété et efficacité énergétique permet de clarifier ces enjeux liés aux modes de distribution des gains d'efficacité énergétique.

## **SUBSTITUTION, EFFICACITÉ, SOBRIÉTÉ**

L'efficacité énergétique permet d'obtenir un même service avec moins d'énergie utilisée. Cette efficacité induit une baisse du prix du service énergétique rendu qui pousse à accroître sa consommation. C'est l'« effet rebond ». La sobriété énergétique consiste à limiter la consommation de ces services énergétiques, autrement dit à contrecarrer l'effet rebond. Il est particulièrement utile de dissocier les rôles respectifs de l'efficacité et de la sobriété dans les scénarios de transition vers la neutralité carbone.

En France, l'association négaWatt est l'une des premières à avoir explicité cette décomposition dans son scénario visant la neutralité carbone en 2050. Ses scénarios prospectifs partent de la demande finale de services énergétiques pour remonter graduellement aux différentes sources mobilisées. Une démarche qui démarre de l'aval pour rejoindre l'amont, en rupture avec la tradition de l'administration française et de ses grands corps d'État basée sur la planification de l'offre d'énergie à partir du stock d'infrastructures existantes.

Le scénario de décarbonation de négaWatt repose sur une division par deux de la consommation finale d'énergie entre 2015 et 2050<sup>16</sup> (et par 2,1 par tête compte tenu de la croissance démographique attendue). Cette diminution permet au système énergétique de rompre radicalement avec la dynamique de l'empilement. Le développement des sources renouvelables et de la

bioénergie permet une substitution totale avec les sources fossiles qui ont été éradiquées du système en 2050, de même que la source nucléaire. Une question clé est de comprendre comment on parvient à réduire autant la consommation finale d'énergie.

À hauteur de 40 %, cette réduction résulte des gains d'efficacité énergétique qui s'accroissent, notamment grâce aux progrès d'efficacité thermique des bâtiments et à l'amélioration des processus de production. Ces gains sont obtenus au prix d'investissements supplémentaires, favorables à la croissance économique. Pour les 60 % restants, l'effet rebond est contrarié dans le scénario par un effet « sobriété énergétique ». Cet effet sobriété traduit des changements de comportements qui, toutes choses égales par ailleurs, ont au contraire tendance à freiner la croissance économique. Cette sobriété peut consister à chasser le gaspillage, par exemple en prenant soin d'éteindre sa lumière quand on quitte une pièce ou à couper son moteur quand son véhicule est à l'arrêt. Ces comportements de bon sens permettent de réduire significativement les consommations d'énergie. Mais il faut aller beaucoup plus loin dans le scénario de décarbonation de négaWatt pour contrer l'effet rebond. Nombre d'actions de sobriété impliquent en réalité de véritables changements de modes de vie.

Dans les bâtiments, la sobriété implique de mettre un coup d'arrêt à l'augmentation des surfaces utilisées, tant pour les bâtiments professionnels que pour les bâtiments résidentiels. Pour le résidentiel, première source de consommation d'énergie finale du pays, la sobriété implique qu'on stoppe l'augmentation de la taille moyenne de chaque logement et que la décohabitation s'interrompe simultanément. Du coup, le principal facteur d'accroissement de la consommation observé par le passé, l'augmentation des m<sup>2</sup> par personne, est neutralisé.

Dans le transport, la sobriété est obtenue par une diminution drastique du nombre de kilomètres parcourus en avion et en voiture individuelle. Dans le même temps, les kilomètres parcourus en transports en commun et covoiturage progressent de même que ceux réalisés à vélo et autres modes de déplacement doux. Le solde, soit le nombre total de kilomètres parcourus, est en diminution, ce qui permet de réduire fortement la consommation énergétique du transport de voyageurs. Celle requise pour le transport de marchandises diminue grâce à la progression du ferroviaire, le transport en commun des marchandises, et à la mutation des chaînes logistiques répondant à la priorité systématique donnée aux filières de proximité.

Le troisième levier de la sobriété énergétique porte sur la consommation de l'ensemble des biens industriels. La production de ces biens requiert de l'énergie, l'« énergie grise » que nous avons rencontrée en introduisant le concept d'effet rebond indirect lié à l'élasticité-revenu. Cette énergie grise peut être économisée grâce à une meilleure efficacité des process, à la réduction des emballages et au recyclage qui économise la plupart du temps de l'énergie. Mais ces gains d'efficacité rendent les biens industriels moins coûteux pour les ménages, d'où le risque d'effet rebond. C'est pourquoi les experts de négaWatt indiquent que ces gains d'efficacité ne sont pas suffisants pour viser la neutralité carbone. Il faut aussi que les ménages changent leurs comportements en adoptant des modes de consommation plus sobres, autrement dit en réduisant la quantité des biens qu'ils achètent. Pour y parvenir, ils peuvent en utiliser certains plus longtemps et, pour d'autres, tout simplement renoncer à leur consommation. On est bien dans une logique de sobriété.

Quand les biens consommés sont produits localement, les économies d'énergie grise apparaissent dans le bilan énergétique



national. Mais si ces biens sont manufacturés à l'extérieur puis importés, l'énergie grise apparaît dans les bilans énergétiques des pays où ils ont été produits. Avec la mondialisation, une fraction croissante de l'énergie grise, et des émissions de CO<sub>2</sub> qui lui sont associées, se redistribue entre pays au gré des relocalisations d'activités. Il convient d'en tenir compte si on veut échapper au schéma des « vases communicants » décrit au [chapitre 1](#), suivant lequel des réductions apparentes d'émission dans les pays riches ne sont en réalité que des transferts vers d'autres pays où sont relocalisés des procédés de production émetteurs de CO<sub>2</sub>.

## **TRAQUER L'ÉNERGIE GRISE POUR RÉDUIRE SON EMPREINTE CARBONE**

Si la gestion des bâtiments est le premier poste de consommation d'énergie finale, les besoins énergétiques de l'industrie (plus le procédé de fabrication du ciment) sont à l'origine du tiers des émissions de gaz à effet de serre dans le monde (et de la moitié de celles de CO<sub>2</sub>). Les process industriels requièrent en effet tous de l'énergie qui peut être fournie par l'utilisation de combustibles ou par de l'électricité. Chaque fois que nous utilisons des produits industriels, nous consommons indirectement cette énergie grise. Réciproquement, nous la diminuons chaque fois que nous réduisons notre consommation ou la reportons vers des biens dont la production et le transport ont requis moins d'énergie.

Sur le plan individuel, il est compliqué d'obtenir une information précise sur la quantité et la localisation de l'énergie grise incorporée dans les biens que nous consommons. Un téléphone portable, un microordinateur ou un écran plat requièrent des centaines de composants dont une part est importée par le pays où se situe

l'usine d'assemblage, généralement basée en Asie. L'énergie grise se répartit entre ces différents centres de production aux systèmes énergétiques hétérogènes. Il faut aussi compter l'énergie utilisée pour le transport des matériaux intermédiaires vers le site d'assemblage et l'acheminement du produit fini jusqu'au lieu de consommation.

L'énergie grise semble *a priori* plus facile à calculer pour des biens dérivés plus directement de la matière première, comme les produits agroalimentaires. Ce n'est qu'en partie le cas. Pour les produits périssables, une grande partie de l'énergie grise est utilisée dans la chaîne du froid qui peut être assez énergivore (et contribuer en plus aux émissions de gaz à effet de serre non CO<sub>2</sub>). C'est aussi le cas des emballages, souvent surdimensionnés, pour des motifs de marketing. Songeons à l'énergie grise contenue dans le biscuit distribué aux enfants pour leur goûter. Pour atteindre le biscuit, il faut extraire du carton d'emballage (possiblement plastifié pour obtenir un effet de brillance) une barquette en matière plastique. Les biscuits ont été rangés par paquet de trois dans la barquette, protégés par un film plastique ou un sachet en aluminium. Un triple emballage qui génère pas mal d'énergie grise, pour un bénéfice social difficile à identifier.

Sur le plan macroéconomique, les politiques d'atténuation du changement climatique reposent sur un système d'information calculant les émissions sur des bases territoriales : le système des inventaires nationaux, normé par des règles de calcul homogènes dérivées des travaux du GIEC. Si ce système renseigne de mieux en mieux sur la quantité de gaz à effet de serre directement émise depuis les différents pays, il ne fournit qu'une information partielle sur leur empreinte carbone totale. En ce qui concerne le CO<sub>2</sub>

d'origine énergétique, cette empreinte dépend de l'énergie grise incorporée dans les échanges extérieurs.

Si un pays importe relativement peu de biens à forte intensité énergétique pour satisfaire les besoins de son système productif et la demande de sa population, et en exporte beaucoup après transformation sur son territoire, son empreinte carbone sera plus faible que ses émissions territoriales. C'est typiquement le cas de la Chine, de l'Inde et de la majorité des économies émergentes. À l'inverse, les pays riches sourcent généralement une fraction croissante de leurs approvisionnements à l'étranger pour maintenir le niveau de vie de leurs populations, par ailleurs de plus en plus regardantes sur la qualité de leur environnement immédiat. Ils ont une empreinte carbone supérieure à leurs émissions territoriales. D'après l'OCDE, il fallait en moyenne augmenter de 15 à 20 % les émissions territoriales données par les inventaires des pays de la zone pour obtenir leur empreinte climatique avant la crise de 2008. Ce chiffre est tombé en dessous de 15 % depuis la crise (12,9 % en 2015)<sup>17</sup>. Un indice suggérant que la « démondialisation », au moins relative, a peut-être commencé.

La France mérite un examen particulier qui relativise quelque peu les résultats dont peut se prévaloir la communication gouvernementale réalisée à partir des données d'inventaire. D'après les données d'inventaire, chaque résident français a réduit ses émissions moyennes de 6,7 tonnes de CO<sub>2</sub> en 1995 à 5,2 tonnes en 2017<sup>18</sup>. Ceci place la France dans une situation plutôt enviable parmi les pays développés, proche de la Suède où les émissions par habitant sont un peu plus basses. Ceci malgré la pause observée entre 2015 et 2017. Le bilan des deux dernières décennies est tout autre si on retient l'empreinte carbone que l'INSEE publie désormais chaque année parmi les nouveaux indicateurs de richesse. En 1995,

l'empreinte moyenne de chaque Français était de 7,7 tonnes de CO<sub>2</sub> par tête. En 2017, de 7,9 tonnes ! Depuis 20 ans, la France a fortement réduit les émissions territoriales, notamment dans l'industrie, mais en leur substituant assez massivement des importations de produits dont la fabrication fait apparaître des émissions en dehors des frontières. Une parfaite illustration du mécanisme des vases communicants.

Le creusement de l'écart entre l'empreinte carbone qui ne plie pas et les émissions sur le territoire en net recul est particulièrement marqué dans les années 1990, jusqu'à la crise de 2008. Durant cette phase d'accélération de la globalisation, le pays a en effet subi une désindustrialisation très brutale. En Allemagne, on a observé des évolutions bien différentes. L'écart entre l'empreinte CO<sub>2</sub> et les émissions territoriales a au contraire été réduit. Plus résistante face à la concurrence internationale, l'industrie manufacturière allemande a accru ses excédents sur la période. Nos voisins émettent chacun en moyenne beaucoup plus de CO<sub>2</sub> que nous, mais ils génèrent, en proportion, nettement moins d'émissions de CO<sub>2</sub> en dehors de leur frontière du fait de leurs structures industrielles.

## **RETOUR SUR L'ÉTIQUETTE VERTE**

L'arithmétique de l'étiquette nous a montré que la clé pour abandonner la logique de l'empilement des sources d'énergie au profit de la substitution des fossiles par des énergies décarbonées était d'abaisser la consommation d'énergie par tête. Pour y parvenir, il faut tenir compte de quelques mécanismes économiques sous-jacents, au cœur de la problématique de la transition énergétique.

Du fait de la baisse des coûts de production et du stockage de l'électricité, un puissant mouvement d'investissement est à l'œuvre

pour élargir la base productive des énergies renouvelables, plus coûteuses en capital mais plus rentables à l'exploitation. L'épicentre de ce mouvement s'est rapidement déplacé de l'Europe vers l'Asie. Il atteint les pays en retard de développement en ouvrant la perspective d'un élargissement de l'accès à l'énergie sans reproduire les étapes de l'accumulation des sources fossiles historiquement suivies par les pays industrialisés.

Ce stock de capital naissant entre en compétition avec celui accumulé pour produire et utiliser les énergies fossiles. La résistance des fossiles repose sur une économie de rente qui incite au réinvestissement dans des actifs prolongeant l'addiction des sociétés à leur utilisation. L'issue de cette compétition entre fossiles et renouvelables ne fait aucun doute. Mais son rythme est déterminant pour le changement climatique. Pour viser l'étiquette verte, il faudra faire vite, et donc déclasser ou reconvertir la plus grande part des actifs matériels, immatériels et humains liés aux fossiles. Introduire dans le prix de l'énergie un coût associé aux émissions de CO<sub>2</sub> permettrait d'anticiper cette charge qui ira croissant à mesure que s'opérera la transition bas carbone.

Les gains d'efficacité énergétique se transmettent spontanément en aval. Ils réduisent le coût d'utilisation de l'énergie en stimulant son usage. L'effet rebond direct provoque une augmentation des achats de l'énergie en réponse à la diminution de son prix unitaire. L'effet indirect transite par l'amélioration induite du pouvoir d'achat de l'utilisateur qui peut augmenter sa consommation d'autres biens et services dont la production requiert également de l'énergie.

La révolution digitale, l'autre grande mutation du système capitaliste, démultiplie le potentiel des gains d'efficacité par ses nombreuses applications contribuant à l'efficacité énergétique. Simultanément, elle accroît la pression sur les prix et les marges.

Elle est un des moteurs de l'économie du low cost, dont Michael Carolan nous rappelle les méfaits sociaux et environnementaux dans son beau livre *Cheaponomics*<sup>19</sup>. Parmi eux, le renforcement de l'effet rebond qui accentue les modes de consommation énergivores sitôt que les besoins essentiels ont été couverts.

Mais les gains d'efficacité constituent aussi un levier pour ouvrir ou améliorer l'accès à l'énergie de populations ou de pays où les services énergétiques de base ne sont pas assurés. C'est pourquoi derrière l'effet rebond se pose la question centrale de la redistribution de ces gains d'efficacité. Dans des sociétés inégalitaires, l'étiquette verte pourrait fort bien être atteinte par une aggravation de la précarité énergétique et le maintien de modes de vie énergivores des privilégiés. Pour y échapper, il faut opérer une double transformation.

D'un côté, redistribuer les gains d'efficacité pour viser un accès universel aux services énergétiques essentiels. Comme dans le cas de la santé, étudié avec perspicacité par Angus Deaton, une telle cible n'est pas automatiquement atteinte pour un niveau donné de revenu moyen par habitant<sup>20</sup>. Tout dépend de l'organisation mise en place par les pouvoirs publics pour assurer la distribution d'un tel service de base. L'exemple des systèmes de cuisson dans le monde souligne combien les défaillances des services publics provoquent une accumulation de retard en la matière, sources de dommages sanitaires considérables. Au sein des pays riches, la persistance d'une précarité énergétique qui n'est pas un phénomène marginal rappelle l'importance des impacts distributifs des politiques suivies, notamment en matière de prix de l'énergie.

De l'autre, la « sobriété énergétique » doit servir d'antidote à l'effet rebond. Pour une part, cette sobriété peut être volontairement choisie par des citoyens mieux informés des risques inhérents au

changement climatique. Indubitablement, de tels comportements se diffusent chez une partie des consommateurs dans les pays développés. Le mouvement est plus marqué pour les achats alimentaires où le lien entre la surconsommation et les risques sanitaires est davantage perçu que pour l'énergie. Mais cette dynamique des nouveaux « consom'acteurs » connaît ses limites. Elle prospère dans les strates les plus aisées et les mieux informées de la société. Ceux qu'on qualifie parfois de « bobos ». La motivation des consom'acteurs repose souvent sur des formes d'individualisme, voire d'égoïsme – son bien-être, sa santé –, peu favorables aux choix collectifs comme, par exemple, le choix du transport en commun *versus* le transport individuel ou l'extension des services publics pour la fourniture des biens essentiels.

C'est pourquoi il est irréaliste d'imaginer des changements spontanés de modes de vie sans des choix politiques forts, couplés à de fortes incitations. Il n'a pas été nécessaire d'interdire la chandelle ou la lampe à pétrole pour généraliser l'ampoule à incandescence. Mais la substitution s'est opérée sur des décennies. En France, l'interdiction de l'ampoule à incandescence a permis de basculer en quelques années vers les LED et autres ampoules basse consommation. Enfin, le prix de l'énergie et sa taxation demeurent un levier incontournable du pilotage des gains d'efficacité. Dans l'économie de marché, l'énergie est économisée là où elle est coûteuse et gaspillée là où elle est bon marché.

Une question importante qui fera l'objet d'approfondissements dans la troisième partie concerne le rôle de la tarification du carbone dans la formation de ce prix. Cette tarification incite à économiser les énergies fossiles dont le coût est accru. Elle crée un écart relatif au profit des sources décarbonées qui stimule la substitution. Mais elle n'incite pas nécessairement à la sobriété énergétique. Tout dépend

du rythme de la substitution. Si la baisse du coût des énergies renouvelables se poursuit grâce aux gains de productivité à la production et surtout lors de la distribution (réseaux intelligents), leur consommation sera stimulée. Or, ces sources sont très abondantes. Pourquoi dès lors les économiser ? On retrouve le rêve d'une « énergie illimitée depuis les rayons solaires » de l'ingénieur Shuman ([chapitre 6](#)). Le rêve de la poursuite de la massification de la consommation, dans un système capitaliste devenu vertueux, parce que débarrassé des énergies fossiles !

L'exigence de sobriété peut-elle se cantonner aux seules énergies fossiles ? Ne doit-elle pas s'appliquer à l'ensemble de l'énergie et, plus largement, au modèle de croissance fondé sur l'empilement des biens et services qui transforme nos sociétés depuis deux siècles ? Au-delà du climat, ce modèle de croissance génère de multiples altérations du milieu naturel et des êtres vivants qu'il héberge. Il affaiblit notamment la capacité des puits naturels à absorber le CO<sub>2</sub> de l'atmosphère. Il est temps d'examiner plus en détail cette seconde jambe de la marche vers la neutralité carbone : l'absorption du CO<sub>2</sub> par des puits de carbone. Après le carbone fossile, place au carbone vivant !



## CHAPITRE 9

### **ATTENTION : CARBONE VIVANT !**

Deuxième jambe de la marche vers la neutralité carbone : la protection des puits qui stockent le CO<sub>2</sub> de l'atmosphère. La feuille de route de la neutralité carbone vise à stabiliser le stock atmosphérique de gaz à effet de serre. Elle exige que ces puits absorbent une quantité de CO<sub>2</sub> équivalente à la totalité des rejets de gaz à effet de serre d'origine anthropique : le CO<sub>2</sub>, mais aussi les gaz non CO<sub>2</sub> dont les deux plus importants sont le méthane et le protoxyde d'azote.

La problématique de la transition énergétique renvoie aux sources fossiles présentes dans le sous-sol : le carbone mort. Celle des puits de carbone repose sur l'activité photosynthétique des plantes : le carbone vivant. L'absorption du CO<sub>2</sub> par le milieu naturel est l'un des nombreux services écosystémiques fournis par la nature. C'est pourquoi actions pour le stockage du CO<sub>2</sub> atmosphérique et protection de la biodiversité sont intrinsèquement liées.

Nous abordons ce chapitre en suivant les pérégrinations historiques de la loutre de mer. L'animal échappa de peu à l'extinction du fait de sa fourrure qui attira un nouveau prédateur : l'homme. La quasi-disparition de ce mammifère puis son

repeuplement ont eu un impact majeur sur la capacité de stockage du CO<sub>2</sub> des écosystèmes marins qu'elle fréquentait. L'océan est de loin le premier réservoir de carbone de la Planète. Maintenir en bon état de marche la pompe à carbone océanique implique de protéger la biodiversité marine. Mais l'océan est un vaste bien commun dans lequel les terriens déversent de multiples rejets et dont ils surexploitent les ressources pour leur alimentation. Pour inverser ces tendances, il faut protéger ce bien commun.

Nous nous intéressons ensuite au puits de carbone continental en nous attachant au rôle pivot joué par l'agriculture. La réorientation des pratiques agricoles est une condition majeure d'atteinte de la neutralité carbone. Elle doit en premier lieu stopper le mécanisme séculaire de la déforestation provoqué par l'extension des surfaces consacrées à la culture et à l'élevage. Mais la façon dont on utilise le sol pour l'agriculture et l'élevage détermine également la quantité de carbone qu'on peut y stocker et le montant des rejets de méthane et de protoxyde d'azote dans l'atmosphère. L'agroécologie regroupe les techniques basées sur les interactions au sein du capital naturel et la production de services écosystémiques minimisant l'empreinte climatique des systèmes agricoles.

Nous terminons le chapitre en nous interrogeant sur les conditions de mise en œuvre de la transition agroécologique. Pour les systèmes agricoles, cela représente une révolution d'ampleur comparable à celle constituée par l'élimination des sources fossiles du système énergétique. Sous l'angle de la demande, l'évolution vers des régimes alimentaires plus diversifiés et plus sobres en ressources primaires en constitue une composante incontournable. C'est à ce prix qu'on pourra assurer une meilleure sécurité alimentaire à une planète de bientôt 9,5 milliards d'habitants. Pour les terriens, la transition agroécologique représente un double

enjeu : atténuer le changement climatique, mais aussi accroître la résilience de leurs sociétés face aux impacts du changement climatique grâce à un réinvestissement dans la diversité du milieu vivant.

## **LA LOUTRE DE MER, L'OURSIN ET LE CO<sub>2</sub>**

Présente le long des côtes du Pacifique Nord, la loutre de mer est le plus petit mammifère marin. Contrairement à ses congénères vivant dans les eaux froides, elle ne dispose pas de couche de graisse facilitant sa régulation thermique. Elle n'a donc pas été victime, comme la baleine, de prédateurs humains en quête d'huiles pour faire fonctionner leurs systèmes d'éclairage ([chapitre 1](#)). En revanche, la loutre de mer est protégée du froid par l'une des fourrures les plus denses du règne animal. Fourrure qui a bien failli causer l'extinction totale de l'espèce.

Avec celle de la zibeline, la fourrure de la loutre de mer est depuis longtemps l'une des plus recherchées au monde. La densité de son pelage permet de confectionner des vêtements chauds, imperméables, extrêmement doux et particulièrement résistants. Les trappeurs russes commencèrent à exploiter commercialement le filon dès le début du XVIII<sup>e</sup> siècle, en s'attaquant au stock d'animaux présents le long des côtes sibériennes. Les fourrures étaient ensuite écoulées en Chine et en Europe. L'activité changea d'échelle au XIX<sup>e</sup> siècle, avec le marché de Londres qui fit fonction de plaque tournante du commerce international des fourrures. Rapidement, les aires de chasse se déplacèrent vers l'est, à la recherche de nouveaux stocks d'animaux. Les côtes de l'Alaska firent rapidement l'objet d'une surexploitation et les chasseurs commencèrent à

s'attaquer à des stocks encore plus fragiles en descendant jusqu'au nord de la côte californienne.

L'envolée du prix des peaux de loutre attisa tant la demande que l'offre eut rapidement du mal à suivre. Le déclin fut très brutal sitôt que le stock d'animaux présents au large de l'Alaska s'épuisa. Sur le marché de Londres, les échanges furent divisés par plus de 10 entre 1885 et 1900. Le prix devint de plus en plus attractif du fait de la pénurie d'offre. En déplaçant les aires de chasse à mesure de l'extermination des animaux, on s'aventurait rapidement vers une extinction totale de l'espèce. Pour éviter l'effondrement final, un traité international, le North Pacific Fur Seal Convention, fut signé en 1911 entre la Russie, les États-Unis, le Japon et le Royaume-Uni (pour le compte du Canada) prohibant la chasse de l'animal. Ce fut l'un des premiers traités internationaux de protection de l'environnement qui sauva probablement une espèce alors ramenée à moins de 2 000 survivants.

On estime aujourd'hui la population de loutres de mer entre 100 000 et 150 000 individus, de l'ordre des deux tiers de sa population d'avant la grande chasse. L'espèce est encore soumise à des prédateurs humains (braconnage, prises accidentelles dans les filets de pêche, marées noires et pollutions côtières) et animales (en particulier les orques et les requins blancs). Certaines populations, notamment dans l'archipel aléoutien au large de l'Alaska, sont à nouveau en déclin.

Pour maintenir sa température corporelle à 35 °C dans des eaux froides, la loutre de mer est contrainte de recharger en permanence son organisme par une alimentation abondante. Elle ingurgite quotidiennement jusqu'au quart de son poids, ce qui la condamne à passer l'essentiel de ses journées à chercher de la nourriture. Carnivore, elle se nourrit principalement de petits crustacés, d'étoiles

de mer et surtout d'oursins. L'oursin est un gros mangeur d'algues. Sitôt que la loutre disparaît, il prolifère au détriment des ressources en algues. Par ses prédateurs, la loutre exerce un rôle régulateur sur la population d'oursins et protège les kelps, ces forêts de varech sous-marines dont est friand l'oursin. Or, ces forêts stockent de grandes quantités de CO<sub>2</sub>. Les chercheurs de l'université de Californie ont estimé que la présence de la loutre accroît d'un facteur 12 la capacité de stockage du CO<sub>2</sub> de ces écosystèmes marins<sup>1</sup>. Le long de la côte de Colombie-Britannique, la réimplantation de la loutre a été un succès. La restauration rapide des kelps permet à l'écosystème côtier de stocker chaque année l'équivalent de 6 à 10 % des émissions de CO<sub>2</sub> de la province<sup>2</sup>. À l'inverse, la dégradation des écosystèmes côtiers pourrait représenter des rejets équivalents à près d'un cinquième de ceux provoqués par la déforestation tropicale<sup>3</sup>.

La régulation de la population d'oursins par celle des loutres illustre un mécanisme que les chercheurs appellent les « cascades trophiques ». Le phénomène a été décrit dès 1949 par le grand écologue américain Aldo Leopold qui observa le déclin de la population des cerfs, un autre herbivore, à la suite de l'élimination du loup, son prédateur naturel<sup>4</sup>. Dans le milieu naturel, la régulation d'une population résulte de multiples interactions, souvent liées aux ressources accessibles (nourriture, habitat...). Mais il faut compter avec ses prédateurs. Les cascades trophiques révèlent le rôle des carnivores en amont des chaînes alimentaires dans la régulation des populations d'herbivores.

## Figure 9.1 La loutre de mer et la biodiversité marine



*Lorsque la population des loutres de mer s'effondre, les oursins prospèrent et les algues disparaissent, ce qui freine le fonctionnement de la pompe à CO<sub>2</sub> océanique.*

Source : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Loutre\\_de\\_mer](https://fr.wikipedia.org/wiki/Loutre_de_mer)

Ce mécanisme peut avoir un impact très significatif sur la capacité de la nature à stocker le CO<sub>2</sub> de l'atmosphère, en raison de la forte propension des terriens à éliminer leurs concurrents carnivores. La prolifération d'oursins consécutive au déclin de la loutre de mer altère localement le fonctionnement de la pompe à carbone océanique. Protéger la loutre est donc une action qui se justifie, au-delà de la valeur qu'on peut donner à telle ou telle espèce, par l'objectif climatique. De même, les grands carnivores

comme l'ours ou le loup régulent les populations de leurs proies herbivores comme l'élan ou le renne. Dans les forêts boréales qui couvrent 10 % de la superficie terrestre et stockent plus de carbone que leurs homologues tropicales, la prolifération de ces herbivores altérerait le couvert végétal et réduirait sa capacité de stockage du CO<sub>2</sub>. La protection des ours et des loups ne se justifie donc pas uniquement par la valeur intrinsèque ou symbolique qu'on peut accorder à une espèce plutôt qu'à une autre. Du fait des cascades trophiques, elle se justifie au Canada et en Russie par la protection d'un des principaux puits de carbone continentaux<sup>5</sup>.

Sur terre comme dans l'océan, l'enjeu de la protection des puits de carbone nous envoie directement à la question des interactions complexes entre les êtres vivants, autrement dit à la question de la biodiversité.

## **LA POMPE À CARBONE OCÉANIQUE ET LA BIODIVERSITÉ MARINE**

Les océans sont, de très loin, le premier réservoir de la Planète stockant du carbone. Ce stock est principalement constitué de sédiments qui s'accumulent au fonds de l'eau. Il résulte, à titre principal, du processus séculaire de dissolution du CO<sub>2</sub> atmosphérique en surface puis du transport du carbone vers les fonds marins où il finit par se transformer en sédiments<sup>6</sup>. D'après les estimations du Global Carbon Project, le puits océanique absorbait de l'ordre de 3 Gt de CO<sub>2</sub> par an à la fin des années 1950 et de 7,5 Gt depuis 2015. Cette hausse est moins rapide que celle des émissions d'origine industrielle : l'océan n'en absorbe plus que le quart en fin de période, contre le tiers dans les années 1950. Nombre de recherches mettent en garde contre les risques de perte

d'efficacité de la pompe à carbone océanique qui constitue le vecteur principal du stockage de carbone à long terme<sup>7</sup>.

Nous avons déjà rencontré au [chapitre 3](#) les problèmes de l'acidification de l'océan et du blanchiment des coraux. Mais l'affaiblissement potentiel de la pompe océanique renvoie à une question plus large. C'est le carbone vivant présent sous l'eau, les algues à l'image des forêts de kelps, qui, avec l'aide de multiples autres êtres vivants, transportent le carbone dissout en surface vers le fond. Comme pour les forêts d'arbres en surface, la photosynthèse y joue un rôle prépondérant. La biodiversité marine est nettement moins bien connue que la biodiversité terrestre. On sait toutefois qu'elle est également altérée par l'empreinte croissante de l'homme. D'après le premier rapport d'évaluation globale de l'Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (IPBES), seuls 3 % de la surface des océans restent indemnes de toute pression de l'homme et deux tiers sont sérieusement affectés par son empreinte<sup>8</sup>.

Les terriens affaiblissent la biodiversité marine de deux façons principales : en utilisant l'océan comme un immense garde-manger dans lequel on peut puiser sans compter de précieuses ressources alimentaires ; en s'en servant comme d'une mégapoubelle où s'accumulent d'innombrables déchets qui peuvent perturber ou détruire certaines espèces marines. Dans les deux cas, on est face à un problème classique d'un bien commun que chacun peut utiliser à sa guise sans payer les coûts de son entretien et de sa reproduction. La protection de la biodiversité implique par conséquent la mise en place de ripostes adaptées pour protéger ce bien commun.

Concernant les déchets, les réponses peuvent être apportées à différentes échelles géographiques. Certaines pollutions résultent du



comportement de populations riveraines de la mer. Par exemple, l'une des causes de mortalité de la loutre marine à proximité des villes californiennes est la transmission de la toxoplasmose via le rejet de litières usagées de chats domestiques transitant par les égouts, ce qui a conduit la Californie à réglementer sévèrement la gestion de ce type de déchet. Ces réponses locales sont importantes, car elles contribuent à protéger les écosystèmes côtiers qui sont très riches. Mais elles ne suffisent pas.

Dans les années 1950, un problème sanitaire majeur apparut dans la baie de Minamata au Japon : plusieurs centaines de décès avérés à la suite de la consommation de poissons eux-mêmes intoxiqués par du mercure. La cause de ces décès – les rejets dans la baie de mercure par l'usine pétrochimique Chisso – fut suspectée dès le milieu des années 1950. Il fallut attendre 1966 pour que l'entreprise cesse tout rejet en supprimant l'utilisation d'oxyde de mercure dans son process de fabrication. Un process qu'elle avait introduit en 1932. Ce scandale sanitaire japonais a joué un rôle important dans la prise de conscience de la nocivité du mercure (plus généralement des métaux lourds) sur les écosystèmes marins et continentaux. Il a conduit à l'adoption en 2013 de la convention dite de Minamata qui réglemente, sous l'égide des Nations unies, l'usage du mercure à l'échelle internationale. Comme les résidus de mercure s'accumulent le long des chaînes alimentaires, un rejet situé très loin de la côte peut fort bien aboutir dans un écosystème marin et y perturber l'équilibre entre les espèces.

Autre illustration de ce type de phénomène : l'accroissement des rejets de plastiques dont une bonne partie finit dans la mer, perturbant l'alimentation des oiseaux et mammifères marins. L'accumulation des rejets de plastiques est ainsi devenue l'une des causes importantes d'affaiblissement des écosystèmes marins.

Quand on jette par mégarde sa paille ou son gobelet en plastique dans la nature à quelques milliers de kilomètres des côtes, on peut ainsi participer, sans s'en rendre compte, à l'affaiblissement de la pompe à carbone océanique.

La première cause d'érosion de la biodiversité marine réside dans les prélèvements effectués par l'homme pour des raisons alimentaires. L'IPBES estime que le tiers des stocks de poisson est surexploité, le phénomène ayant tendance à s'aggraver du fait des techniques industrielles de pêche qui permettent de s'attaquer à des réserves halieutiques autrefois protégées des prédatons humaines par leur éloignement (distances des côtes et profondeur). Les réponses à apporter sont ici sur l'eau. Il s'agit de gérer les droits de pêche. De la stricte interdiction aux quotas de pêche qui peuvent être cessibles, il existe toute une gamme d'instruments pour limiter les prises en fonction des capacités de régénération de la ressource. Leur mise en œuvre se heurte à des coalitions d'intérêt de court terme, favorisées par l'inexistence d'une instance souveraine dédiée à la protection du bien commun océanique.

L'expérience de la déplétion du stock de morues de Terre-Neuve qui connut dans les années 1980 un effondrement comparable à celui de la loutre montre combien il est nécessaire d'utiliser ces instruments à titre préventif. À la suite de l'interdiction totale de la pêche à Terre-Neuve, le stock ne s'est pas reconstitué. L'élimination des individus adultes a en effet déstabilisé l'équilibre antérieur de la chaîne alimentaire. Elle a provoqué la prolifération d'espèces qui détruisent les individus juvéniles, ce qui a bloqué la reconstitution de la population adulte. Si des quotas de pêche restreignant les prises avaient été introduits avant l'effondrement, il est probable qu'on serait parvenu à sauver et le stock de morues adultes et une activité de pêche gérée de façon responsable. La protection de la

biodiversité marine, support de la pompe à carbone océanique, est donc liée à la gestion des ressources alimentaires. Une dimension que l'on retrouve sur les terres émergées.

## **LE PUIT DE CARBONE TERRESTRE : LES ARBRES ET LES SOLS**

Comme pour la pompe à carbone océanique, la photosynthèse des plantes constitue le moteur du puits de carbone terrestre. Les végétaux absorbent du CO<sub>2</sub> atmosphérique durant leur croissance. Suivant l'état du milieu naturel, et notamment la richesse des écosystèmes le composant, une partie plus ou moins grande du CO<sub>2</sub> absorbé par les plantes peut ensuite être stockée dans les sols. La capacité d'absorption du CO<sub>2</sub> atmosphérique sur terre est donc directement liée au maintien de sa biodiversité.

D'après le premier rapport d'évaluation de l'IPBES, ce sont les changements d'usage des sols qui constituent la première empreinte humaine affaiblissant la biodiversité sur les continents. Parmi ces changements, l'expansion des surfaces utilisées pour la culture ou l'élevage a été, de loin, la principale emprise anthropique au détriment de la richesse du milieu naturel<sup>9</sup>.

Depuis très longtemps, l'empreinte la plus directe des terriens sur le puits de carbone terrestre est la déforestation. Historiquement, les foyers de déforestation se sont déplacés d'Europe d'abord vers l'Amérique du Nord puis vers les pays tropicaux ([chapitre 1](#)). Du fait de ce jeu de vases communicants, les quantités globales de CO<sub>2</sub> relâchées par la déforestation, assez fluctuantes d'une année à l'autre, ont beaucoup moins varié que celles résultant de l'usage des énergies fossiles : de l'ordre de 4,5 Gt par an au début du xx<sup>e</sup> siècle, elles étaient estimées à environ 5,5 Gt par an au milieu du siècle

dernier et à un peu plus de 5 Gt durant la décennie 2010. La cause dominante de cette déforestation n'a pas changé : l'extension de l'usage des sols pour l'agriculture et l'élevage. L'arrêt de la déforestation tropicale implique donc d'agir prioritairement sur ces causes agricoles.

Dans les pays tempérés, l'intensification de l'agriculture a permis d'accroître les approvisionnements alimentaires en cessant d'empiéter sur les forêts. Mais de nouvelles concurrences sont apparues dans l'usage des sols. L'aire occupée par la forêt gagne, généralement au détriment de terres marginales abandonnées par l'agriculture. Simultanément, les besoins d'espaces pour l'habitat périurbain, les infrastructures commerciales de loisirs ou de transports se font croissants. Dans le secteur énergétique, on peut noter au passage que l'emprise terrestre des énergies renouvelables est plus large que celle des énergies fossiles, mais bien moindre que celle des bioénergies. La prolifération de ces infrastructures tend à mordre sur des terres agricoles ou préalablement laissées à l'état naturel. Ce qu'on qualifie assez improprement en France d'« artificialisation des sols ». Une nouvelle forme de changement d'usage des sols qui, le plus souvent, altère le fonctionnement du puits de carbone terrestre même si on peut limiter les dégâts en végétalisant au maximum les nouveaux quartiers ou centres commerciaux. Retenons que pour freiner la dégradation du puits de carbone continental, il faut gérer ces nouvelles concurrences entre le béton, le milieu naturel et les terres agricoles.

L'intensification agricole provoque également des changements d'usage des sols à l'intérieur même de l'agriculture. Certains, comme le retournement des prairies permanentes, la destruction des haies, les labours de plus en plus profonds ou l'usage de produits chimiques qui altèrent la vie des sols, provoquent des relâchés de

carbone dans l'atmosphère et/ou limitent la capacité du sol à le stocker. *A contrario*, changer ces pratiques accroît la capacité de stockage du carbone dans les sols. La troisième variable à prendre en considération pour protéger le puits de carbone continental est donc le mode d'utilisation des sols par l'agriculture qui dépend des itinéraires techniques retenus par les agriculteurs. Cette variable joue aussi bien dans les systèmes agricoles recourant massivement à la mécanisation et à la chimie que dans ceux plus traditionnels. En milieu aride, le surpâturage est par exemple une pratique particulièrement déprédatrice pouvant aboutir à la stérilisation de sols s'étant totalement vidés de leur carbone.

Dernier point, et non des moindres, les itinéraires techniques retenus par les agriculteurs ont également un impact sur les émissions de méthane et de protoxyde d'azote. Les rejets de méthane dépendent en premier lieu du nombre de ruminants et de la façon dont ils sont nourris, de la gestion des déjections dans les élevages intensifs, des itinéraires retenus pour produire le riz et enfin des techniques de brûlis dans les systèmes traditionnels. Ceux de protoxyde d'azote résultent de la gestion des engrais azotés, qu'ils soient d'origine chimique ou organique.

En France, les émissions de méthane et de protoxyde d'azote liées à l'agriculture (y compris le traitement des déchets en fin de vie) ont représenté en 2017 l'équivalent de 88 millions de tonnes de CO<sub>2</sub>, soit un cinquième des émissions nationales. Les changements d'usage des sols en ont absorbé de l'ordre de 40 millions de tonnes, principalement grâce à la croissance des arbres et l'extension du couvert forestier. Autrement dit, si toutes les émissions générées par l'usage des énergies fossiles (y compris par les agriculteurs) et les procédés industriels étaient miraculeusement éliminés, l'agriculture et la forêt resteraient des émettrices nettes, car les écosystèmes ne

sont plus en mesure d'absorber une quantité de CO<sub>2</sub> équivalente au pouvoir de réchauffement des émissions agricoles de méthane et de protoxyde d'azote. Il est donc crucial d'intégrer les gaz hors CO<sub>2</sub> dans la balance si on veut atteindre un jour la neutralité carbone

## **LA PROTECTION DE LA FORÊT TROPICALE**

Depuis 1970, la forêt tropicale a sans doute perdu un cinquième de sa superficie. Elle couvre encore près de 12 % des terres émergées, soit bien moins que les forêts boréales et tempérées. Elle constitue une réserve sans pareil de biodiversité, à l'origine de la fourniture de multiples services écosystémiques dont la grande majorité ne font pas l'objet d'une valorisation sur les marchés et ne sont pas comptabilisés dans les grandeurs économiques standards comme le PIB ou l'IDHI (indicateur de développement humain). La sauvegarde de ces services est la motivation première des actions conduites pour protéger ce milieu naturel exceptionnel. Le stockage de carbone n'est que l'un de ces services.

Les forêts tropicales primaires étant arrivées à maturité depuis longtemps, elles n'absorbent plus guère de CO<sub>2</sub> supplémentaire. Mais elles piègent un important stock de carbone qui retourne à l'atmosphère en cas de déforestation ou de dégradation. Sous l'angle du climat, l'enjeu majeur de la protection de la forêt tropicale est d'empêcher ce transfert de carbone depuis le réservoir terrestre vers l'atmosphère. Dans les trois grandes aires géographiques concernées, la pression exercée par l'agriculture et l'élevage est l'un des facteurs déterminants à l'origine de la déforestation. C'est sur ces causes que doit prioritairement porter l'action.

L'arc forestier Asie-Pacifique part de la péninsule indochinoise, traverse la Malaisie, l'Indonésie et le Nord de l'Australie, pour

déboucher en Papouasie-Nouvelle-Guinée. Il couvre environ 3 millions de km<sup>2</sup>. C'est le massif qui a décliné le plus rapidement depuis 1970. L'Indonésie, devenue au début des années 2010 le premier défricheur mondial devant le Brésil<sup>10</sup>, en constitue l'épicentre. L'extension des cultures de rente, en particulier le palmier à huile, et l'industrie de la pâte à papier en sont deux moteurs importants, comme le grignotement des forêts pour l'agriculture vivrière généralement à l'origine des feux déclenchés intentionnellement. L'exportation, souvent en contrebande, de bois d'œuvre vers la Chine a accéléré le mouvement. Le quart de la forêt indonésienne est implanté sur des tourbières, des milieux humides particulièrement riches. Quand ces sols sont retournés et drainés, ils relâchent des quantités de CO<sub>2</sub> de trois à six fois supérieures à celles présentes dans les arbres.

En Afrique au sud du Sahara et à Madagascar, la forêt tropicale couvre une surface double de celle de l'arc Asie-Pacifique. La première cause de la déforestation est l'extension de pratiques agricoles ou pastorales provoquées par la croissance démographique. En savane arborée (forêt tropicale sèche), le surpâturage se conjugue à la culture sur brûlis pour appauvrir le milieu naturel. En zone humide, l'extension des plantations de café et de cacao (Ghana, Côte d'Ivoire) et les exportations de bois exotiques viennent s'ajouter à la pression des systèmes vivriers. La quête du bois de feu pour les systèmes de cuisson exerce enfin une pression supplémentaire dans l'ensemble de la zone.

L'Amérique latine abrite la moitié des forêts tropicales mondiales. Principal massif, la forêt amazonienne brésilienne occupait 4 millions de km<sub>2</sub> en 1970 (plus de 7 fois la superficie de la France métropolitaine), mais seulement 3,3 millions en 2018. Elle a constitué le principal foyer de déforestation dans le monde jusqu'au

milieu des années 2000. Entre 2004 et 2012, le rythme de déforestation a été divisé par quatre<sup>11</sup>, une performance sans équivalent dont on peut tirer quelques enseignements.

L'État brésilien a mené jusqu'à la fin des années 1980 une politique vigoureuse de colonisation agricole de l'Amazonie, subventionnant l'installation de petits agriculteurs tournés vers des systèmes vivriers, avec une vision stratégique d'occupation du territoire fédéral. Après la chute de la dictature militaire (1985), la politique libérale favorise l'« agro-business » à base de ranchs exportant la viande bovine sur le marché de Chicago et la culture du soja. Malgré la mise en place dans les années 1990 de réserves forestières en lien avec les peuples autochtones, le rythme de la déforestation continue de progresser jusqu'en 2004.

La situation change radicalement dans la décennie suivante sous la présidence de Lula (2003-2010). Le système national d'imagerie satellite permet au gouvernement fédéral de mieux lutter contre la déforestation illégale. En réaction à des campagnes d'ONG, un moratoire est mis en place en 2006 sur les exportations de soja et les règles sur le marché de Chicago interdisent l'importation de viande issue de zones récemment défrichées. Simultanément, le pays devient un laboratoire de projets visant à concilier l'amélioration des pratiques des petits agriculteurs et la protection de la forêt. Comme l'a analysé Gabriela Simonet pour des projets conduits dans le cadre du Fonds Amazone<sup>12</sup>, la difficulté est de mettre en place des incitations économiques qui rémunèrent durablement les pratiques respectueuses de la forêt. En l'absence de modèles économiques donnant un avantage définitif à ces pratiques, les résultats obtenus restent fragiles.

C'est ce que montre la reprise de la déforestation sur la période récente. Entre 2012 et 2018, le rythme de déforestation a de



nouveau doublé, alors que le pays faisait face à une grave crise économique et morale affaiblissant la capacité d'impulsion du pouvoir fédéral. Avec l'arrivée à la présidence de Jair Bolsonaro en janvier 2019, il est à craindre que cette dynamique s'accélère. Comme simultanément l'Indonésie a réalisé des progrès rapides en 2017 et 2018, le Brésil a retrouvé son statut de premier défricheur mondial de forêt tropicale.

On peut retenir deux leçons principales de l'expérience brésilienne : les cycles d'accélération-décélération de la déforestation répondent aux changements de priorité opérés à l'égard des producteurs agricoles, grands et petits ; en l'absence de modèles économiques donnant un avantage définitif aux pratiques agricoles respectueuses de la diversité biologique des forêts, les progrès réalisés par les politiques forestières restent réversibles. Examinons de plus près ces pratiques.

## **PRODUIRE « ÉCOLOGIQUEMENT INTENSIF »**

L'expression « agriculture écologiquement intensive » est de Michel Griffon, l'un des précurseurs de l'agroécologie en France<sup>13</sup>. En Europe, l'agroécologie est souvent associée à l'idée d'une agriculture moins intensive qui tournerait le dos à plusieurs décennies d'intensification conduites sous l'égide de la politique agricole commune (PAC). C'est une simplification dangereuse. Il y a de multiples pratiques agricoles extensives dévastatrices pour le milieu naturel. À l'inverse, nombre d'itinéraires techniques pratiqués en agroécologie permettent d'accroître la production à l'hectare, dans certains cas de façon spectaculaire. Et c'est heureux, car la parade pour freiner l'empiètement des systèmes agricoles sur la forêt passe généralement par leur intensification.

La ligne de démarcation entre agriculture prédatrice de l'environnement et agroécologie ne se repère nullement par les différences d'intensification à l'hectare. Elle renvoie au mode d'utilisation du capital naturel. Pour reprendre les termes de Bill Mollison, le fondateur avec David Holmgren du concept de permaculture, il s'agit de « travailler avec, plutôt que contre la nature » et d'« observer les plantes et les animaux dans toutes leurs fonctions, plutôt que de les considérer comme de simples produits appartenant à des systèmes séparés<sup>14</sup> ». Autrement dit, l'agroécologie vise à basculer vers des systèmes de production reposant sur les complémentarités entre les différents éléments du capital naturel. Elle vise à asseoir ces systèmes sur la diversité du vivant.

En sélectionnant des populations de plus en plus homogènes en fonction de leur rendement potentiel, le productivisme agricole a été un formidable réducteur de diversité biologique. Amorcé depuis longtemps dans les pays développés, ces méthodes se sont déployées dans le reste du monde à partir des années 1960 avec la « révolution verte », enclenchée par les recherches du professeur Borlaug sur les variétés de blé à haut rendement destinées aux pays en développement. Les agriculteurs et les éleveurs ont travaillé des souches vivantes de plus en plus homogènes en rejetant dans les marges une grande partie du capital de diversité génétique des systèmes traditionnels. L'agroécologie vise à reconstituer une telle diversité, en commençant par réorienter le travail de sélection génétique pour recréer de la diversité et asseoir l'agriculture sur des systèmes plus résilients.

Conséquence directe de cette valorisation de la diversité génétique : la réduction des intrants chimiques et des besoins en eau d'irrigation. Le corollaire des variétés homogènes sélectionnées

pour leur rendement est souvent une fragilité bien plus grande et donc le déploiement induit de toute une panoplie d'interventions destinées à supporter artificiellement la croissance des plantes ou des animaux. Réintroduire de la diversité biologique dans les systèmes de production limite drastiquement ces besoins d'intrants. Dans de nombreux cas, cela permet d'éliminer totalement les intrants chimiques (agriculture biologique).

Parmi les complémentarités entre composantes du capital naturel, la liaison entre le couvert végétal et la vie des sols est un paramètre crucial de l'agroécologie. L'agroforesterie en constitue une illustration particulièrement intéressante qui peut fournir des alternatives judicieuses au déboisement. Autre variable d'importance : les rapports entre le végétal et l'animal. Les méthodes industrielles appliquées à la culture et à l'élevage ont généré une spécialisation des espaces agricoles, avec certains compartiments qui se vident d'animaux quand d'autres les hébergent de façon intensive. Ces spécialisations altèrent la richesse du milieu et accroissent ses vulnérabilités. L'agroécologie vise à retrouver des synergies entre l'animal et le végétal en s'inspirant de celles observées dans la nature.

Pour l'agriculture, le basculement vers l'agroécologie correspond à des changements structurels d'ampleur comparables à ceux que nous avons analysés dans le cas de la transition énergétique. Il implique une mobilisation de grande ampleur de capital naturel et de capital humain (recherches fondamentales et appliquées, apprentissages de terrain, formation des agriculteurs). Dans certains cas, la transition agroécologique peut tirer les leçons de pratiques ancestrales, notamment de savoir-faire des communautés autochtones qui ont su préserver des milieux naturels très précieux. On en déduit parfois à tort qu'il s'agirait d'une sorte de retour en

arrière. C'est tout l'inverse. Pour réussir ces transitions, il faudra mobiliser de multiples connaissances nouvelles, pratiques et théoriques. En France, les programmes de recherche de l'INRA ont été réorientés dans ce sens depuis le début de la décennie 2010<sup>15</sup>. Des recherches qui permettent de mieux comprendre le rôle des transformations agricoles dans la marche vers la neutralité carbone.

## **FERTILISER LES SOLS SANS RÉCHAUFFER LA PLANÈTE**

La fertilisation des sols à l'aide d'engrais azotés est la deuxième source d'émission d'origine agricole dans le monde, après les rejets de méthane par les ruminants. Chaque année, elle rejette une quantité de protoxyde d'azote dans l'atmosphère qui exerce un pouvoir de réchauffement à peu près équivalent à celui de deux années de trafic aérien. Réduire ce type d'émission n'est donc pas une affaire de second ordre.

Pour beaucoup de consommateurs urbains peu familiers des techniques agricoles, le bio est à la fois bon pour la santé et bon pour la Planète. Il suffirait donc de basculer vers le bio en supprimant les engrais chimiques pour résoudre le problème. On apporterait ainsi à la Planète un bénéfice climatique équivalent à ce que représenterait l'immobilisation de toute l'aviation civile pendant deux années complètes. Sans compter les économies de CO<sub>2</sub> obtenues grâce à l'arrêt des usines de production d'engrais chimiques, plutôt énergivores.

Sauf que le monde vivant est plus complexe que ne le suggère cette représentation binaire un peu naïve. À chaque rapport d'évaluation, le GIEC opère un recensement détaillé des émissions d'origine agricole dans le monde. On y voit que l'épandage des engrais organiques issus des animaux d'élevage, une pratique

ancestrale, reste la première source d'émission liée à la fertilisation des sols, les engrais chimiques n'ayant été à l'origine que de 40 % de ces émissions en 2010<sup>16</sup>. L'agriculture bio n'est donc pas la parade absolue : son impact sur les émissions de protoxyde d'azote dépend de la façon dont les agriculteurs passés au bio gèrent leur fertilisation. S'ils épandent trop d'engrais organiques par rapport aux besoins de la plante, une partie du surplus d'azote se dissipe dans l'air pour accroître le stock de gaz à effet de serre, une autre est lessivée ou s'infiltre dans les sols pour polluer les rivières ou les nappes phréatiques (les fameux « nitrates »).

Il existe une panoplie assez large d'actions pour limiter les émissions de protoxyde d'azote. L'introduction de légumineuses dans les rotations est une voie très bénéfique, car ces plantes fixent naturellement l'azote de l'air. Ces légumineuses peuvent produire de l'huile (soja, arachide), être consommées par l'homme (lentilles, fèves, haricots) ou par les animaux (luzerne, trèfles, protéagineux). De nombreuses variétés ligneuses peuvent être utilisées en agroforesterie. L'autre voie concerne la fertilisation raisonnée dans laquelle les producteurs agricoles réduisent les apports pour mieux les faire correspondre aux besoins de la plante et éviter la dissipation des excédents dans l'atmosphère. Les exemples chinois et français montrent les difficultés à résoudre pour avancer sur ces voies.

En Chine, la sécurité alimentaire est une priorité récurrente des plans quinquennaux. Pendant l'ère maoïste, elle a été synonyme d'autosuffisance dans un contexte de rationnement alimentaire. Depuis les années 1980, elle vise à assurer des approvisionnements qui sont dopés par l'intégration rapide de produits animaux dans la ration alimentaire moyenne. Pour faire face à l'envolée de la demande, des méthodes industrielles sont introduites à grande

échelle, faisant de la Chine le premier utilisateur d'engrais azotés au monde, avec des doses à l'hectare pour les cultures comparables (céréales à paille) de l'ordre de deux fois celles observées dans le Bassin parisien. La montée des problèmes environnementaux a impulsé un vigoureux changement d'orientation à partir du douzième plan quinquennal (2011-2015), avec l'objectif de réduire l'usage de ces intrants. Les travaux de Wen Wang montrent que près d'un tiers des réductions atteignables à court terme serait rentable pour les exploitations agricoles<sup>17</sup>. La réduction des apports en engrais azotés se heurte pourtant à de nombreux obstacles. Les autorités régionales continuent d'envoyer des incitations en termes d'accroissement des volumes produits. Le dynamisme des productions animales génère une abondance de matière organique dont il faut bien trouver un usage. Le prix des engrais chimiques reste subventionné. Les agriculteurs sont peu réceptifs aux nouvelles préconisations de l'Académie chinoise d'agriculture, car ils voient dans les surdoses d'engrais à l'hectare une sorte de prime d'assurance contre les risques de baisse de rendement. Une forme d'aversion au risque qu'on retrouve dans d'autres contextes.

En France, les émissions liées à la fertilisation ont baissé d'un peu plus de 5 % entre 1990 et 2017, reflétant un certain découplage par rapport aux productions végétales, en progression d'environ 10 % sur la période. La diminution des apports d'engrais reflète la progression des pratiques raisonnées, désormais diffusées par les organismes de développement agricole. L'ère du productivisme où les producteurs agricoles faisaient la course au rendement est en effet révolue depuis que la politique agricole commune est entrée en réforme, dès 1984 pour le lait et en 1992 pour les céréales. Le mot d'ordre est désormais à l'optimisation des marges. Pour autant, les chercheurs de l'INRA font, à partir d'approches technoéconomiques

très fouillées, des constatations assez similaires à celles rencontrées en Chine : nombre de réductions d'émission économiquement rentables ne sont pas mises en œuvre sur le terrain<sup>18</sup>. Autrement dit, les agriculteurs renoncent à gagner de l'argent en continuant à surdoser les apports de fertilisants relativement aux besoins des plantes. On peut y trouver de multiples raisons : dissymétries d'information, inertie des comportements, conflits d'intérêt chez les prescripteurs qui, souvent, font aussi office de fournisseurs... Une approche assez féconde est de l'interpréter en termes d'aversion au risque. Face aux multiples aléas qui font varier les rendements, les agriculteurs voient les engrais comme une forme d'assurance. Les surdoses des apports sont autant de primes qu'ils acceptent de payer suivant leur plus ou moins grande aversion au risque<sup>19</sup>. Dans la panoplie des incitations pour réduire les émissions, il y a donc sans doute place pour des instruments assurantiels.

Ces deux exemples révèlent en premier lieu le potentiel élevé des réductions d'émission qu'on peut viser en modifiant les pratiques de fertilisation. Ils soulignent également les multiples barrières qu'il faut franchir pour faire muter les systèmes productivistes existants (ou pour ne pas y entrer dans le cas des pays en développement). Il s'avère souvent difficile de faire évoluer une pratique, dans notre cas la fertilisation, sans toucher aux autres composantes du système de production. La force de l'agroécologie réside dans sa capacité à utiliser les interactions dans le milieu naturel pour produire mieux et plus. Pour les producteurs conventionnels, cela exige de changer simultanément nombre de pratiques, tant sur l'exploitation que dans ses relations avec l'extérieur. C'est l'ensemble d'un système qu'il faut changer et pas seulement l'une ou l'autre de ses composantes. Ceci ressort des approches par projet. Examinons-en quelques-uns qui visent à améliorer le stockage du CO<sub>2</sub> dans les sols.

## STOCKAGE DU CO<sub>2</sub> ET AUTRES SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES

Revenons au stockage de carbone. L'arme principale pour contrer la déforestation tropicale consiste à agir sur ses causes agricoles. Mais en changeant ses pratiques, l'agriculture peut aussi contribuer à stocker directement le carbone : le semi-direct, la prairie permanente, les haies, les cultures intercalaires contribuent au stockage du carbone dans le sol ; l'érosion de terres nues, le labour, l'excès de produits chimiques le vident de sa matière vivante en rejetant du CO<sub>2</sub>. L'initiative « 4 pour 1 000 », lancée à la conférence climat de Paris en 2015, a l'ambition de promouvoir le stockage du carbone dans les sols.

L'objectif a été fixé sur la base d'une arithmétique assez rudimentaire. Le stock mondial de carbone dans les sols agricoles, sur une épaisseur moyenne de 40 cm, est de l'ordre de 860 Gt. Si on était capable de l'accroître de 0,4 pour 1 000 chaque année, on absorberait en moyenne 3,4 Gt (860 multipliés par 0,004). Ces 3,4 Gt permettraient, avec l'aide du puits de carbone océanique et en supposant que la déforestation tropicale ait cessé, d'absorber la totalité des émissions de CO<sub>2</sub> résultant de l'utilisation de l'énergie fossile et de la production de ciment<sup>20</sup>. Une nouvelle façon d'atteindre la neutralité carbone !

Cependant, l'objectif n'est pas plus facile à atteindre que de retirer toutes les sources fossiles du système énergétique. Là où les sols sont déjà saturés en carbone, on ne peut accroître le stockage. La priorité est alors, comme pour les tourbières indonésiennes, de les protéger contre les risques de déstockage. Là où les sols sont dégradés et pauvres en matière vivante, il y a un potentiel conséquent de stockage de CO<sub>2</sub> si on parvient à inverser la tendance grâce à des pratiques agricoles adaptées. Ce potentiel est particulièrement élevé en Afrique, dans les zones sahéliennes et



semi-arides où la restauration des sols agricoles permettrait simultanément de lutter contre l'insécurité alimentaire en augmentant les rendements à l'hectare. Toute la difficulté est de trouver la bonne façon d'y parvenir<sup>21</sup>.

Il n'y a aucune recette miracle en la matière, mais une multiplicité d'expérimentations conduites dans des contextes chaque fois différents. Une caractéristique commune semble être que le stockage du carbone obtenu n'est que l'un des bénéfices environnementaux apparaissant avec le temps. Les pratiques agroécologiques se développent sur le terrain quand on parvient à démultiplier ces bénéfices et surtout à en retourner une partie conséquente aux producteurs agricoles.

C'est l'un des retours d'expérience des fonds Livelihoods créés à partir de 2011 par des entreprises désireuses d'investir dans le domaine de la production alimentaire et de la biodiversité<sup>22</sup>. Les projets de reconstitution de mangroves au Sénégal et en Indonésie comportent une forte dimension carbone du fait du potentiel de stockage élevé de ces milieux aquatiques. L'économie des projets repose sur un préfinancement par les investisseurs en échange de crédits carbone futurs. La reconstitution de la mangrove permet ensuite d'apporter de nouvelles ressources aux communautés locales et d'améliorer leur niveau de vie : ressources halieutiques grâce à la reconstitution de la biodiversité marine et riziculture. Dans ce cas de figure, le stockage de carbone joue le rôle d'amorceur de projets. On retrouve la même logique sur terre dans le projet d'Embu mené au pied du mont Kenya, conjuguant efficacité énergétique et agroforesterie. Le volet énergie consiste à investir dans des foyers améliorés pour la cuisson permettant de limiter la consommation de bois de feu et de réduire les prélèvements sur le milieu. Le volet agroforesterie consiste à planter de nouvelles essences, notamment

fruitières. La croissance des arbres stocke du carbone et leur exploitation s'intègre dans les systèmes agricoles locaux, fournissant aux familles des ressources alimentaires et financières.

Le projet brésilien de Tingua vise à développer des systèmes familiaux d'agriculture bio en amont de Rio. Ici, pas de préfinancement par le crédit carbone. Tingua est situé à proximité d'un des principaux points de captage d'eau potable, une zone soumise à de fortes pressions humaines du fait de sa proximité d'une métropole de plus de 12 millions d'habitants. L'investissement vise à améliorer les systèmes de production agricole tout en assurant la qualité des eaux potables. Le stockage de carbone dans les sols devient alors un cobénéfice, non rémunéré, résultant de la reconstitution de la matière organique dans les sols au fil de l'amélioration des pratiques culturales. Les bénéfices monétarisés résultent de l'accroissement de la productivité à l'hectare et de la rémunération de l'amélioration de la qualité de l'eau par le producteur local d'eau minérale.

Le lien entre richesse des sols en matière organique et capacité de stockage de l'eau se retrouve sous d'autres latitudes. D'après un calcul de Bernard Chevassus-au-Louis, auteur d'un ouvrage clé sur la biodiversité<sup>23</sup>, augmenter de 2 % la teneur en carbone des terres cultivées du Bassin parisien permettrait de stocker autant d'eau que le réservoir Marne, la plus importante retenue d'eau en amont de Paris. Investir dans des pratiques agricoles qui stockent le carbone permettrait donc de faire des économies sur les infrastructures de régulation des rivières.

En France, le stockage du carbone est en premier lieu l'un des cobénéfices de l'agriculture biologique dont un ressort agronomique majeur est le renforcement des sols en matière organique. L'impact global de la montée du bio sur les quantités de CO<sub>2</sub> absorbées est

mal mesuré. À l'échelle microéconomique, une évaluation conduite sur la ferme maraîchère avant-gardiste du Bec-Hellouin montre le rôle central de ce mécanisme qui a permis d'atteindre des rendements élevés à l'hectare sur des sols initialement très appauvris. Au Bec-Hellouin, le stockage du carbone dans le sol, comme d'autres services écosystémiques (développement de la faune), n'est pas rémunéré en lui-même. Le modèle économique repose sur la valorisation de la production par des filières courtes assurant une rémunération directe des producteurs<sup>24</sup>. Dans le cas de l'agriculture biologique, le modèle économique permettant le stockage du carbone repose sur l'économie d'intrants chimiques et une meilleure valorisation du produit auprès du consommateur.

L'enjeu majeur du stockage du carbone dans les sols concerne les grandes cultures et les prairies qui occupent la grande majorité de l'espace agricole. Une étude récente de l'INRA recense les pratiques agricoles susceptibles de stocker le carbone dans les sols, puis calcule les quantités pouvant être potentiellement stockées ainsi que les coûts associés<sup>25</sup>. Elle estime que l'équivalent de près de 5 % des émissions nationales de gaz à effet de serre pourrait être stocké d'ici 2030 si on généralisait immédiatement l'ensemble de ces méthodes. Mais elle ne dit rien sur les leviers à mettre en place pour changer les pratiques des agriculteurs.

On renforce le puits de carbone des sols en évitant de les laisser à nu, par exemple grâce à des cultures intercalaires. Une telle installation a un coût qui peut être en partie amorti par des économies sur la fertilisation, un levier supplémentaire pouvant être la méthanisation à la ferme servant de débouché. L'agroforesterie est un autre levier. Elle peut être obtenue grâce à la replantation des haies autrefois supprimées à grande échelle au nom du productivisme. Les haies sont des réservoirs de biodiversité à

proximité des champs, qui apportent de multiples services, dont le stockage de carbone. Ces services environnementaux apparaissent sur le long terme et ne sont pas tous monétisables. C'est pourquoi plusieurs projets dans l'Ouest de la France visent à en faciliter la reconstitution, par une meilleure valorisation du bois de bocage ou par des crédits carbone<sup>26</sup>. Mais pour assurer à eux seuls la rentabilité de la reconstitution des haies, il faudrait que le prix de ces crédits soit très élevé. La rémunération du stockage de carbone ne peut donc jouer qu'un rôle d'appoint ou d'amorçage.

Ces changements de pratiques agricoles permettent de stocker du carbone sans modifier l'usage des sols. Or, l'un des facteurs majeurs de la perte de carbone des sols a été le retournement des prairies à la suite de changements de modes de production animale. Ceci nous conduit à la question cruciale de l'équilibre entre végétaux et animaux dans les systèmes agricoles et alimentaires.

## **PIÉGER LE CO<sub>2</sub> DANS LA PRAIRIE, RELÂCHER LE MÉTHANE DANS L'ATMOSPHÈRE**

Entre 1970 et 2018, la surface agricole utilisée en France métropolitaine a reculé de près de 4 millions d'hectares (– 12 %). Une grande partie a été convertie en forêts ou en landes qui stockent plus de CO<sub>2</sub> que la majorité des sols agricoles. La déprise agricole n'a donc guère affaibli le puits de carbone national.

Durant cette période, les agriculteurs ont retourné près de 5 millions d'hectares de prairies permanentes. Pour leur plus grande part, ils les ont transformées en terres arables pour y cultiver des céréales ou des oléagineux. Une part importante de ces productions végétales, songeons à l'expansion du maïs dans certaines régions, a été destinée à l'alimentation des animaux d'élevage. Aux relâchés

de CO<sub>2</sub> résultant du retournement des prairies se sont donc ajoutées les émissions issues de la gestion des nouveaux élevages plus intensifs.

Parmi les facteurs ayant appauvri les écosystèmes agricoles, les changements d'équilibre entre le végétal et l'animal ont été une variable déterminante. L'élevage « hors sol » éloigne les animaux d'élevage des terres qui les nourrissent, avec le facteur multiplicatif du commerce international (soja, tourteaux...). C'est une forme d'intensification qui rompt la complémentarité entre l'animal et le végétal sur l'exploitation et incite à des pratiques appauvrissant les écosystèmes. Elle permet d'accroître rapidement les approvisionnements en viande et en lait, en affaiblissant les services fournis par la biodiversité, ceux de stockage de carbone mais également de reproduction des insectes pollinisateurs, de rétention d'eau...

Favoriser les prairies permanentes est désormais une priorité de la PAC, au nom de la reconstitution de la diversité biologique des sols. C'est une bonne intention qui ne va pas résoudre grand-chose si on ne va pas un peu plus loin dans l'analyse. Que mettre sur ces prairies, sinon des ruminants qui sont de véritables usines à rejeter du méthane dans l'atmosphère ? Les rejets des ruminants représentent 40 % des émissions agricoles nationales. Ils sont généralement plus élevés pour les animaux qui se nourrissent à l'herbe ou aux fourrages grossiers, car le rendement énergétique est moins optimisé. On risque donc de perdre le bénéfice du CO<sub>2</sub> stocké dans les prairies par les rejets de méthane des ruminants qui occuperont ces nouveaux espaces.

La vraie question à traiter est plus largement le type de complémentarité qu'on veut viser entre le végétal et l'animal. Revenir aux systèmes traditionnels de polyculture-élevage n'est

probablement pas la voie à suivre : on ne construit pas l'avenir par un retour au passé. Mais les systèmes agricoles de demain devront inventer des synergies nouvelles entre le végétal et l'animal en revenant sur cette ségrégation croissante entre espaces vidés des productions animales et espaces surchargés en animaux d'élevage. Bien entendu, un paramètre clé à prendre en considération est le fait que les animaux d'élevage ne sont pas tous de bons convertisseurs énergétiques. Pour produire 1 kg de viande bovine, il faut en moyenne de l'ordre de 25 kg de matière sèche pour nourrir l'animal, contre seulement 6 pour le porc et 3 pour le poulet. Comme le porc et le poulet ne rejettent pas de méthane lors de leur digestion, on voit clairement ce qui économise les émissions et ce qui les accroît<sup>27</sup>.

La question se pose avec une acuité encore plus grande dans les pays émergents. En Chine, Wen Wang a extrapolé les données officielles d'inventaires, ce qui montre les grandes tendances à l'œuvre. L'augmentation de l'urbanisation et l'amélioration du niveau de vie ont créé une demande très forte de produits animaux. Au début des années 1960, un Chinois ne consommait guère plus de 4 kg de viande par an, à peu près autant qu'un Indien. La demande de viande s'accélère à partir de 1980, à la suite de la libéralisation des marchés agricoles et de la fin du rationnement, pour dépasser 65 kg en 2017, soit pratiquement le niveau européen. En comparaison, le régime alimentaire indien est resté étonnamment frugal.

Pour répondre à la pression de la demande, les plans successifs chinois ont tenté de limiter le recours aux importations de viande et de produits laitiers en incitant au développement d'élevages intensifs, quitte à importer de l'alimentation du bétail (soja principalement). Les émissions agricoles se sont accélérées dans la

décennie 2000, pour atteindre de l'ordre de 1 Gt d'équivalent CO<sub>2</sub> vers 2015, faisant du pays le premier émetteur de gaz à effet de serre d'origine agricole au monde. La structure de ces émissions reflète l'évolution du régime alimentaire de plus en plus dispendieux en calories animales. Le poids de la riziculture, première culture traditionnelle, diminue régulièrement. Les émissions liées à la fertilisation augmentent plus nettement. Les rejets de méthane résultant de la digestion des ruminants et de la gestion des déjections dans les élevages intensifs sont les deux postes qui s'accroissent le plus rapidement.

La dynamique des émissions agricoles renvoie aux évolutions des régimes alimentaires. Comme pour les émissions de CO<sub>2</sub> issues des énergies fossiles, l'action pour réduire les émissions comporte un volet concernant la demande. Pour renforcer le puits de carbone terrestre, il faut miser sur l'agroécologie côté offre et sur l'efficacité et la sobriété des régimes alimentaires côté demande.

## **SÉCURITÉ, SOBRIÉTÉ, EFFICACITÉ DES RÉGIMES ALIMENTAIRES**

Depuis 1970, la production alimentaire mondiale s'est accrue plus rapidement que la population. La croissance de la disponibilité alimentaire moyenne par habitant a permis de réduire significativement la faim dans le monde durant les dernières décennies : d'après la FAO, un cinquième de la population mondiale était en situation de sous-nutrition au début des années 1990, proportion ramenée aux environs de 11 % dans les années 2010. Ces progrès semblent interrompus depuis 2015, avec une lente remontée du fléau entre 2014 et 2017<sup>28</sup>.

La persistance de la faim dans le monde ne résulte pas d'une insuffisance globale de nourriture. Elle provient de son inégale distribution. Aussi voit-on se développer deux formes de malnutrition. En 2017, 820 millions de personnes souffrent de sous-nutrition, quand 670 millions de personnes obèses, population en croissance rapide, sont victimes de leur propre surconsommation. Les deux phénomènes ne sont pas indépendants, comme l'exprime de façon provocante Harari dans son best-seller *Sapiens* : « Chaque année, la population américaine dépense plus d'argent en régimes amaigrissants qu'il n'en faudrait pour nourrir tous les gens qui ont faim dans le reste du monde<sup>29</sup>. »

La sobriété alimentaire vise à contenir l'envahissement de la surconsommation de nourriture. Elle est moins une affaire de comportements individuels qu'un problème de santé publique. Le coût sanitaire de la surconsommation (maladies cardiovasculaires, diabètes...) est croissant. Dans de nombreux pays, il coexiste directement avec celui de la sous-nutrition. Les préconisations de la médecine nutritionniste sont assez claires. Il faut une nourriture moins abondante mais plus diversifiée : moins de sucres et de graisses animales, plus de produits frais et de fibres. Faire passer ce type de message auprès des publics visés exige un lourd travail d'information qui se heurte à de multiples communications commerciales vantant les mérites du fast-food et des aliments standardisés produits en masse. Sur le plan économique, la sobriété ne fait pas toujours bon ménage avec le porte-monnaie. Les produits surconsommés sont bien souvent issus de circuits qui utilisent toutes les ficelles du low cost pour fournir massivement du premier prix. Les produits qu'il faut introduire sont généralement plus coûteux. Une façon de réduire les coûts est d'utiliser au maximum la diversité des écosystèmes locaux en faisant appel aux filières de proximité



qui exigent moins de transport. On observe par exemple que la dynamique de la demande de bio s'accompagne d'un développement des circuits courts au détriment des grandes surfaces.

Dernier problème : si on parvient à faire des économies grâce à la sobriété retrouvée des surnourris, rien ne dit qu'on parviendra à les utiliser pour combattre plus efficacement la faim. Ce combat implique de redistribuer des ressources vers les populations les plus vulnérables. Ces populations appartiennent généralement au monde rural. Elles sont dispersées et parmi les plus sévèrement exposées aux impacts du changement climatique. À l'évidence, de telles redistributions ne résulteront pas du jeu spontané des acteurs sur les marchés, mais d'une impulsion volontariste des politiques publiques de développement.

L'efficacité d'un régime alimentaire peut se jauger à la quantité des ressources primaires mobilisées pour approvisionner les humains en énergie vitale. C'est une forme particulière d'efficacité énergétique. Elle comporte des dimensions qualitatives et culturelles importantes qui impriment une extraordinaire diversité aux régimes alimentaires. Malgré cette diversité, un ressort invariant : sitôt les besoins essentiels en calories et protéines couverts, la place des apports carnés dans la ration, notamment ceux issus des ruminants (bovins et ovins) qui sont de mauvais transformateurs de calories végétales et de très gros émetteurs de méthane, joue un rôle décisif dans l'efficacité du système. Un régime diversifié et peu carné économise beaucoup de ressources primaires. C'est pourquoi il sera bien plus facile de réduire les empreintes climatiques négatives de l'agriculture si on se dirige vers de tels régimes alimentaires dans le monde.

Comme on l'a vu dans le cas de la Chine, la hausse du niveau de vie s'accompagne généralement d'une transformation du régime alimentaire, par intégration de calories animales dans la ration, principalement sous forme de viande. Ce type d'évolution ne répond à aucun déterminisme universel, comme le rappelle l'Inde où chaque habitant ne consomme en moyenne guère plus de viande en 2018 qu'en 1960 (multiplication par 10 en Chine !). Elle est cependant très largement répandue, ce qui explique les écarts de consommation importants de viande entre l'Amérique du Nord (proche de 115 kg/an), l'Europe occidentale (85 kg) et les pays moins avancés (moins de 15 kg). Une question majeure pour l'avenir de la sécurité alimentaire est de savoir si ces pays vont suivre plutôt une évolution « à la chinoise » qui rapproche le modèle alimentaire de celui de l'Occident (sous l'angle de la consommation de viande), ou plutôt s'inspirer de la frugalité indienne.

Dans les projections à moyen terme de la FAO et de l'OCDE, l'effet d'imitation des modèles de consommation occidentaux prime. Du fait de l'incorporation croissante de viande dans la ration des pays à faible revenu, la demande de produits carnés augmente fortement. Le lien avec les émissions anthropiques de méthane et de protoxyde d'azote n'est pas explicitement fait, de même que celui avec le puits de carbone terrestre. Une telle évolution des régimes alimentaires rend particulièrement difficiles l'atténuation des empreintes climatiques négatives de l'agriculture et, indirectement, celle de la déforestation dont un moteur important est la consommation finale de viande.

Des tendances nouvelles pourraient cependant infléchir la marche vers des modèles trop carnés. En Europe, depuis le début des années 1990, plus récemment aux États-Unis, la consommation de viande par habitant recule. Cela répond en premier lieu à une

perception nouvelle des risques sanitaires. La maladie de la vache folle a été en Europe le catalyseur pour les viandes rouges. C'est désormais l'ensemble des risques résultant de la surconsommation de graisses animales qui sont perçus par le grand public. Comme pour les pollutions locales, ces motifs liés à la santé peuvent avoir un impact rapide sur les comportements des ménages. Il s'y ajoute celui, plus militant, de la prise en compte du bien-être animal qui gagne des couches de plus en plus larges de la société. Enfin, la préoccupation environnementale et climatique est une dimension qui devrait également accélérer la marche vers des régimes alimentaires moins carnés et donc plus économes en ressources et en rejets de gaz à effet de serre. Pour le climat, l'accent doit être mis sur les viandes bovines et ovines dont les consommations ont des empreintes climatiques sans commune mesure avec celle des autres espèces animales. Une façon de l'indiquer au consommateur serait d'imputer le coût de cette externalité climatique par une taxation appropriée. Une voie qui n'a pas encore été testée en pratique.

En l'absence d'incitations économiques, la sobriété et l'efficacité des modèles alimentaires se diffusent lentement. La contestation des modèles alimentaires carnés émane des pays riches. Elle mettra du temps pour imprimer sa marque à l'échelle globale. Cette inertie du temps freine le rythme de la transformation agroécologique. Elle est évoquée par les partisans de « plans B » censés accélérer la marche vers la neutralité carbone grâce aux puits de carbone artificiels.

## **LES PUIITS ARTIFICIELS : DOMESTIQUER LA NATURE ?**

Face aux incertitudes et aux délais de retour de l'investissement dans la reconstitution des puits de carbone naturels, il peut être tentant de chercher à court-circuiter le temps en investissant dans des puits de carbone artificiels, l'une des deux voies de la géo-ingénierie. On peut investir dans de tels puits en mer, sur terre ou en captant directement le CO<sub>2</sub> dans l'air.

En mer, la loutre contribue au bon fonctionnement de la pompe à carbone en facilitant le développement d'algues. Un autre agent y contribuant est le fer dont a besoin le phytoplancton pour prospérer. Or, de vastes zones océaniques éloignées des côtes sont pauvres en fer, ce qui freine la croissance de la microalgue et, par voie de conséquence, le fonctionnement de la pompe à carbone. D'où l'idée d'ensemencer artificiellement l'océan en rejetant des tonnes de sulfate de fer depuis des bateaux pour dynamiser sa croissance. L'idée, testée en grandeur réelle par des équipes nord-américaines, s'avère inefficace et dangereuse. Inefficace parce que la croissance du phytoplancton observée en milieu réel est bien inférieure à celle obtenue en laboratoire. Dangereuse, parce qu'elle provoque des effets secondaires déséquilibrant la biodiversité marine, dont certains toxiques pour les chaînes alimentaires. Plutôt que d'imaginer renforcer de façon artificielle la pompe à carbone océanique, la prudence recommande de limiter les empreintes humaines déstabilisant la biodiversité en laissant le soin à la nature de retrouver de nouveaux équilibres.

Sur terre, les procédés dit BECCS (Bio-energy with Carbon Capture and Storage) permettraient de produire de l'énergie en stockant du carbone. Il suffit pour cela de connecter une unité produisant de l'énergie à partir de biomasse renouvelable, considérée comme neutre en carbone, avec un dispositif de captage et stockage du carbone. On peut dès lors produire de l'énergie à

« émission négative ». Contrairement aux autres techniques de géo-ingénierie, le BECCS est une option considérée comme pertinente par les experts du GIEC. La majorité des scénarios prospectifs compatibles avec un réchauffement limité à 1,5 °C figurant dans son rapport reposent sur le déploiement de cette technique « à émission négative » durant la seconde partie du siècle<sup>30</sup>.

Déployer à grande échelle des procédés BECCS n'est probablement pas la panacée. Les bioénergies sont gourmandes en espace et potentiellement destructrices de biodiversité, comme l'a illustré le développement des biocarburants aux États-Unis et en Europe. À l'échelle microéconomique, le développement des BECCS semble générer de sérieux bénéfices climatiques. Le premier pilote industriel devrait être la centrale électrique de Drax située dans le Yorkshire (RU), pendant longtemps la première centrale à charbon du pays. Incité par le prix du CO<sub>2</sub> (pour lequel il existe un plancher au Royaume-Uni), l'opérateur a décidé de substituer progressivement le charbon par du bois. L'objectif est désormais de capturer une partie du CO<sub>2</sub> produit par la combustion du bois pour faire de Drax la première centrale au monde à émission négative. Difficile de critiquer une telle démarche. Mais que se passerait-il si elle se généralisait ? Le changement d'échelle pourrait avoir des effets dévastateurs sur la biodiversité, car il exigerait de dédier de vastes espaces à la monoculture d'espèces ligneuses à haut rendement énergétique mais à faible valeur écologique. Dans son premier rapport d'évaluation, l'IPBES met en garde contre de tels scénarios qui se réaliseraient au détriment des aires protégées ou agricoles<sup>31</sup>. La nature ne pourra pas durablement nourrir plus de 9,5 milliards d'habitants après 2050 et les approvisionner en énergie à émission négative !

On ne peut pas gérer ce dilemme à partir du prix du CO<sub>2</sub> qui tarifie la seule externalité climatique. Pour y faire face, nos sociétés devront tester les multiples voies possibles pour accroître le stockage du carbone, produire de l'énergie décarbonée et maintenir la diversité du milieu naturel. Pour prolonger la capacité de stockage de CO<sub>2</sub> des forêts, plutôt que de brûler les arbres dans des centrales BECCS, on peut élargir l'usage du bois dans la construction. Les techniques modernes permettent d'utiliser des charpentes en bois dans des immeubles de grande hauteur, avec une excellente protection contre les incendies. Cette piste génère des innovations technologiques prometteuses, comme le procédé développé par le groupe Cerdia permettant d'allonger la durée de vie des bois de construction grâce au traitement chimique de la cellulose<sup>32</sup>. Autre voie d'avenir : l'« agrinergy » pratiquée par la société Akuo, qui vise à coupler sur un même espace production d'électricité solaire et pratiques agricoles reposant sur la diversité du milieu naturel<sup>33</sup>. Une autre façon de produire de l'énergie à émission négative !

Capter directement le CO<sub>2</sub> dans l'air pour le stocker dans le sol est la troisième façon d'accroître les puits de carbone artificiels. Si on utilise des réservoirs sécurisés à faible empreinte écologique, l'option apparaît sans risque direct pour la biodiversité. À une nuance près : le procédé est gourmand en une énergie qui ne pourra pas être utilisée ailleurs. On peut certes investir pour améliorer l'efficacité du procédé. Mais ne vaudrait-il pas mieux commencer par exploiter le gisement des gains d'efficacité permettant de réduire la quantité d'énergie déjà utilisée dans la société ?

Les techniques de stockage artificiel posent toutes de multiples questions. Leur déploiement à grande échelle s'effectuerait probablement au prix d'une accélération de la perte de biodiversité dont les coûts pour la société ne sont incorporés ni dans les valeurs

économiques courantes, ni dans le calcul du prix du CO<sub>2</sub>. Succomber aux mirages de ces approches technologiques visant à domestiquer la nature risque de nous détourner de l'essentiel : l'enclenchement de la transition agroécologique.

## **LE TEMPS DE LA TRANSITION AGROÉCOLOGIQUE**

L'histoire de la loutre de mer et de l'oursin nous a ouvert les yeux sur l'enjeu crucial du maintien de la biodiversité marine pour protéger le premier puits de carbone de la Planète : les océans. Un domaine dans lequel les connaissances des scientifiques sont encore lacunaires et qui renvoie, pour l'économiste, à la question de la gestion d'un bien commun promis à disparition si on laisse jouer les lois du marché sans limiter sa libre utilisation.

Notre attention s'est ensuite portée sur le puits de carbone terrestre, dont le fonctionnement a été altéré de multiples façons par l'empreinte de l'agriculture et le défrichement des forêts. Le rôle clé des transformations agroécologiques dans la marche vers la neutralité carbone est alors apparu.

La réorientation des pratiques agricoles et forestières permet d'accroître le stockage de CO<sub>2</sub> et de réduire les émissions de gaz à effet de serre non CO<sub>2</sub>. Comme pour la sortie des sources fossiles du système énergétique, cela implique de profondes réorganisations des systèmes de production à base de techniques agroécologiques permettant de maintenir le capital de diversité du milieu naturel. Côté demande, ces mutations seront facilitées par l'adoption de régimes alimentaires moins carnés et plus diversifiés qui économisent les ressources agricoles primaires et apportent de multiples bénéfices sanitaires.

Comme pour la transition énergétique, les contraintes de temps pesant sur la transition agroécologique sont redoutables. Ici, les facteurs d'inertie ne concernent pas l'empilement des infrastructures matérielles et immatérielles. Ils résultent de l'atomicité et de la grande diversité des systèmes de production dont beaucoup peuvent difficilement mobiliser du capital, de leurs multiples interactions avec un milieu naturel perturbé par l'emprise humaine, des rythmes biologiques incompressibles qui conditionnent les temps de retour de l'investissement dans l'agroécologie et la diversité du milieu naturel.

Mais les similitudes avec le système des énergies fossiles peuvent être trompeuses. On pourrait par exemple imaginer que le secteur du carbone vivant ne constitue qu'un quart du problème climatique, puisqu'il n'est à l'origine que d'un quart des rejets anthropiques de gaz à effet de serre. C'est une triple erreur.

En premier lieu, l'investissement dans la transition agroécologique apporte un double bénéfice sous l'angle du climat. Grâce à la réduction des rejets de gaz à effet de serre non CO<sub>2</sub> et à l'amélioration de la capacité d'absorption du CO<sub>2</sub> atmosphérique, il contribue à la marche vers la neutralité carbone. Il renforce simultanément d'autres services écosystémiques, comme la pollinisation des insectes ou la fertilité du sol assurée par la matière vivante, qui favorisent la résilience des systèmes agricoles face au réchauffement global. Bien conduite, l'agroécologie fournit une double arme face aux changements du climat. Elle permet d'atténuer le réchauffement et, simultanément, d'accroître la résilience des systèmes de production face à ses impacts. Un double bénéfice qu'on ne retrouve pas dans le cas de la transition énergétique : une éolienne est bien plus sensible aux impacts du réchauffement qui modifie le régime des vents qu'un gisement de gaz ou une mine de



charbon dont les stocks en terre ne sont pas affectés par les perturbations climatiques.

En deuxième lieu, les instruments d'action à mettre en œuvre pour accélérer les transitions agroécologiques posent des problèmes tout à fait nouveaux. Dans le système énergétique classique, on a une cause unique et facilement mesurable du réchauffement : la quantité de CO<sub>2</sub> rejetée par la combustion des énergies fossiles. Le système est unidimensionnel. Si on veut accélérer la sortie des fossiles, la mécanique à mettre en place est très simple conceptuellement. On peut soit renchérir leur utilisation via la tarification, soit les réglementer. Dans le monde du carbone vivant, cela ne marche pas comme cela. On se heurte à la complexité du vivant. Utiliser la biodiversité des sols pour limiter la fertilisation azotée, replanter une mangrove ou restaurer la richesse des sols en matières organiques pour stocker plus de carbone sont des opérations qui utilisent la diversité du vivant pour produire de nouveaux services. Ces pratiques ne peuvent être stimulées par l'application de la tarification d'une externalité environnementale unique ou d'une simple réglementation limitant l'accès au capital naturel.

Enfin, le lien entre le climat et l'appauvrissement du milieu vivant nous rappelle que le dérèglement climatique n'est pas le seul système de régulation naturel abîmé par l'empreinte humaine. Les travaux conduits sous l'égide de Johan Rockström, alors directeur du centre de Stockholm sur la résilience, ont défini neuf frontières planétaires au-delà desquelles l'activité humaine déstabilise de tels systèmes<sup>34</sup>. La déplétion de la couche d'ozone, la dégradation du cycle de l'eau, le changement climatique, l'affaiblissement de la biodiversité en font partie. Les limites que ces frontières imposent à l'homme fonctionnent différemment de celles concernant la finitude

des matières premières : s'il n'y a plus de pétrole en terre, on ne peut plus l'utiliser comme combustible. La variable de contrôle à surveiller est le stock exploitable restant en terre. Sitôt que ce stock tombe à zéro, la partie de l'activité humaine dépendante de cette énergie s'arrête. Par ailleurs, taper dans la réserve de pétrole n'affecte pas directement celles de charbon ou de fer.

Pour les frontières planétaires, cela fonctionne différemment. On pénètre dans la zone dangereuse bien avant de subir en retour les dommages. Si on dépasse le budget carbone correspondant à un réchauffement de 2 °C en 2030, il faudra quelques décennies pour que cela apparaisse dans le thermomètre, et les impacts se manifesteront pendant des siècles. En matière de biodiversité, l'affaiblissement de la population d'une espèce peut se répercuter sur l'ensemble d'un écosystème du fait des interactions multiples entre êtres vivants. D'où la crainte d'apparition de dynamiques d'effondrement, comme celles observées pour la loutre de mer ou la morue, bien après que la frontière a été franchie. De tels risques d'effondrement sont accentués par les interactions entre climat et biodiversité. En altérant la capacité de stockage du CO<sub>2</sub> par la biosphère, la réduction de la biodiversité aggrave le réchauffement. En retour, le réchauffement climatique accentue l'appauvrissement de la biodiversité. Pour casser cet engrenage, il ne suffit pas de sortir les sources fossiles du système énergétique. Il convient d'intégrer pleinement la dimension du carbone vivant en impulsant la transition agroécologique à peine amorcée.

### PARTIE III

# JUSTICE CLIMATIQUE

La première partie du livre s'est penchée sur la situation d'urgence, pointée par les aiguilles de l'horloge climatique. Dans la deuxième, nous avons examiné l'ampleur des transformations à réaliser pour réduire notre addiction aux énergies fossiles et protéger les puits de carbone en réinvestissant dans la diversité du vivant. Ces transformations ont commencé, mais leurs effets ne se feront sentir qu'avec des délais sur la trajectoire globale des émissions de gaz à effet de serre.

Du fait du stock de ces gaz déjà accumulé dans l'atmosphère, le réchauffement va se poursuivre, alors même que la transition énergétique va inverser la trajectoire d'émission. Pendant plusieurs décennies, il faudra vivre avec des émissions qui reculent, mais des températures qui continuent d'augmenter. Cette discordance temporelle est porteuse de risques. Dans les régimes démocratiques, l'impatience grandissante des citoyens peut déstabiliser l'assise de la société. Du côté des régimes autoritaires, la tentation d'imposer depuis le centre des méthodes expéditives au nom du climat peut renforcer l'arbitraire et aggraver le déséquilibre écologique.

Pour limiter ces risques, il convient d'identifier les bons « accélérateurs de transition ». Les candidats sont nombreux avec, chaque fois, des supporters différents.

Il y a le gisement des innovations technologiques et de l'accélération possible de leur diffusion. On a vu combien le changement d'échelle de l'éolien et du photovoltaïque pouvait redistribuer les cartes. Les spécialistes de l'innovation, comme l'économiste Philippe Aghion, misent beaucoup sur cette dimension technologique. La difficulté est cependant de jauger jusqu'où peut conduire le « techno-optimisme ». Certaines options de géo-ingénierie, au déploiement rapide et peu coûteux, font penser à un « plan B » risquant de retarder la marche vers la neutralité carbone.

Pour les économistes orthodoxes, il faut surtout orienter la recherche et l'innovation dans la bonne direction grâce à l'utilisation de la tarification carbone qui intègre l'externalité climatique dans les valeurs échangées. C'est en jouant sur les incitations économiques qu'on modifiera les choix de l'ensemble des acteurs. Ces économistes ont converti les grandes institutions économiques comme la Banque mondiale, l'OCDE ou le FMI qui préconisent désormais l'utilisation de la tarification carbone à l'échelle internationale. Certaines banques centrales commencent à prendre en considération le risque climatique, ce qui pourrait utilement conduire à une réallocation des portefeuilles financiers.

Face aux embûches rencontrées lors de la mise en place de telles taxations, une idée revient en force : le déploiement d'un investissement public massif. Dans cette vision, c'est à l'État de porter la charge du combat pour le climat, quitte à prendre des libertés par rapport aux règles ringardes de la stabilité monétaire et financière. Quant à la réorientation des investissements et consommations privés vers le bas carbone, elle pourra s'opérer via

les normes. Aux États-Unis, cette vision d'un Green New Deal est portée par la gauche du parti démocrate ; en France, elle a été popularisée par l'ouvrage de Jean Jouzel et Pierre Larrouturnou *Pour éviter le chaos climatique et financier*<sup>1</sup>.

N'oublions pas les changements de comportements des citoyens, dont l'agrégation peut conduire à de véritables transformations des modes de vie. La tarification du carbone, en changeant les prix relatifs, peut jouer le rôle d'aiguillon, de même que le renforcement des normes environnementales si elles sont appliquées intelligemment. Mais comment les citoyens se mettraient-ils en mouvement s'ils ne voient pas dans la transition bas carbone la promesse d'un monde plus juste ? Dans l'histoire, ce sont de telles promesses qui ont libéré les forces requises pour changer l'ordre initial des choses. C'est ce fil qui va guider la troisième partie.

Pour transiter vers la neutralité carbone dans les temps, tous ces accélérateurs de transition devront être mis à contribution. Les économistes ont trop tendance à les opposer les uns aux autres. Chacun aura son rôle à jouer. Mais la réussite de l'agencement d'ensemble nous semble reposer sur la capacité qu'auront nos sociétés à s'accorder sur des règles de justice qui stimulent les efforts du plus grand nombre et protègent les plus vulnérables. Dans la troisième partie du livre, nous cherchons à identifier ces règles non pas en nous projetant dans un monde alternatif idéal, mais en cherchant à voir comment elles peuvent s'appliquer au monde carboné tel qu'il fonctionne aujourd'hui, avec la toute-puissance des marchés. Nous avons bien conscience des limites des apports de l'économiste en la matière. Écoutons ce que nous en dit le philosophe Michael J. Sandel à la fin de *Justice* :

« Dans la mesure où la marchandisation de certaines pratiques sociales peut corrompre ou altérer les normes qui les définissent, il

faut que nous nous demandions quelles normes non marchandes nous voulons protéger de l'influence du marché. C'est une question qui exige l'organisation d'un débat public pour trancher entre des manières rivales d'évaluer ces biens. [...] Sauf à vouloir laisser les marchés réécrire les normes qui gouvernent les institutions sociales, nous avons besoin de débattre ensemble des limites morales du marché<sup>2</sup>. »

Notre prétention n'est certainement pas de nous substituer au débat public. Encore moins aux philosophes qui savent, bien mieux que les économistes, contribuer à la réflexion collective sur les limites morales du marché. Nous souhaitons, avec le lecteur, nous poser trois questions susceptibles d'accélérer la transition bas carbone.

Au [chapitre 10](#), nous faisons un double détour par les tribunaux et auprès du philosophe Rawls pour tenter de formaliser les principes permettant de définir des politiques climatiques justes. Nous en avançons quatre : le partage d'une métrique indépendante ; l'application du principe du pollueur-payeur ; la réévaluation du rôle des politiques d'adaptation ; la maîtrise des effets anti-distributifs des actions d'atténuation. Nous nous interrogeons ensuite sur les liens entre les inégalités économiques et la dynamique des émissions de gaz à effet de serre.

Au [chapitre 11](#), nous analysons comment ces principes peuvent s'appliquer à la négociation internationale. Un accord climatique doit aligner les intérêts stratégiques des pays pour éradiquer les comportements de passager clandestin. La tarification carbone peut y contribuer d'une double façon. En accélérant la sortie des énergies fossiles par son volet incitatif ; en démultipliant les financements pour accroître la résilience des pays les plus vulnérables. Avec le durcissement attendu des impacts du réchauffement, le

renforcement du volet adaptation devient un facteur clé de réussite de l'accord.

Au chapitre 12, nous nous concentrons sur le cas de la France. Nous suggérons trois voies pour accélérer la marche vers la neutralité carbone. Un rééquilibrage de l'action publique au profit des régions et municipalités, les plus à même de lutter contre les fractures territoriales que va aggraver le réchauffement ; le renforcement de l'action de l'État par une révision de ses priorités d'investissement, une action plus sélective sur les normes et le renforcement d'une tarification carbone redistributive ; l'action en faveur de la constitution, au sein de l'Europe, de la première zone de l'économie mondiale travaillant avec un prix minimum du CO<sub>2</sub>.

## CHAPITRE 10

### **VOUS AVEZ DIT JUSTICE CLIMATIQUE ?**

Mars 2019. À la suite de la pétition « L'affaire du siècle », signée par plus de 2 millions de personnes ([chapitre 4](#)), quatre ONG environnementales déposent un recours devant le tribunal administratif de Paris, visant la carence de l'État en matière climatique. La France est entrée dans le club des pays où l'État est poursuivi par une partie de ses citoyens lui reprochant son inaction face au réchauffement climatique.

Nous abordons ce chapitre par une visite au prétoire pour examiner la façon dont le juge traite la question climatique. La multiplication des contentieux pourrait faire émerger une jurisprudence fournissant aux juges une définition juridique partagée de ce qu'est la justice climatique. C'est le rôle des juristes de nous éclairer sur celle-ci. Notre approche est par nature différente. Nous sommes en quête de règles permettant de construire des politiques climatiques « justes » pour, précisément, échapper aux recours juridiques, dont la vertu première n'est pas d'accélérer l'action.

Nous partons de la distinction classique entre justice commutative, réparatrice et distributive. C'est en combinant ces trois dimensions qu'on obtient les principes d'une politique climatique juste.



La justice commutative exige des systèmes fiables et indépendants de mesure des émissions et de comptabilisation des actions les réduisant. C'est le socle de départ, sans lequel il est impossible de construire une politique climatique juste.

La justice réparatrice est une forme d'application du principe du pollueur-payeur. En matière climatique, une politique juste doit imputer le coût des dommages climatiques aux émetteurs de gaz à effet de serre. La tarification du carbone en constitue une traduction économique possible.

La justice distributive pose la question de l'équité dans la protection d'un bien commun planétaire : la stabilité du climat. La question est multidimensionnelle, donc complexe. L'équité doit être jugée entre les membres de chaque génération, mais aussi entre ceux de génération différente. Elle concerne les inégalités de niveau de vie au sein des pays, le plus souvent en augmentation, mais aussi celles entre pays, en forte réduction. Nous proposons deux critères distributifs pour les politiques climatiques : veiller, à chaque génération, à ce que les dommages climatiques n'accroissent pas la position des plus défavorisés (politiques d'adaptation) ; corriger les impacts anti-distributifs de l'application du principe du pollueur-payeur.

Nous terminons ce chapitre en examinant le lien entre les inégalités économiques et les émissions de gaz à effet de serre. Nous concluons que la crise climatique pourrait, avec la récession de 2009, constituer l'un des chocs majeurs obligeant, en réaction, nos sociétés à faire refluer la vague montante des inégalités économiques si bien analysée par l'économiste Branko Milanovic.

## **LE CLIMAT AU PRÉTOIRE**

En France, le climat vient juste de s'introduire au prétoire avec plusieurs recours en justice<sup>1</sup>. « L'affaire du siècle » semble être celui qui résume le mieux les carences reprochées à l'État. Les juges mettront plusieurs années pour statuer sur la question. Au terme de leur jugement, il y aura sans doute appel de l'une ou l'autre des parties. L'affaire risque d'être portée en dernier recours devant le Conseil d'État, ce qui ne manquera pas d'allonger les délais. Il est bien trop tôt pour en tirer les leçons.

Mais la judiciarisation de la question climatique n'est pas propre à la France. De par le monde, les tribunaux sont de plus en plus souvent saisis par des plaignants qui poursuivent des opérateurs engagés dans des projets d'extraction d'énergie fossile leur semblant incompatibles avec les objectifs climatiques. C'est une forme assez classique d'activisme environnemental, probablement amené à se développer tant que « les fossiles font de la résistance ». La problématique du changement climatique introduit des formes inédites de recours devant la justice. Certains tribunaux doivent statuer sur des poursuites pour réparation de préjudices imputés au changement climatique. D'autres voient apparaître des recours contre des États accusés de ne pas assurer leurs obligations au titre de leurs responsabilités climatiques.

Septembre 2015. Le tribunal d'Essen, dans la Ruhr, est saisi d'une plainte émanant de Saúl Luciano Lliuya, fermier et guide de montagne de son état. Lliuya poursuit RWE, la compagnie électrique qui a son siège à Essen, par ailleurs le plus gros émetteur de gaz à effet de serre en Europe. Le plaignant veut faire reconnaître la responsabilité de RWE dans les risques induits par la fonte des glaces. Sa maison est située dans le village colombien de Huaraz, à 4 500 mètres d'altitude, sous le lac Palcacocha qui menace de déborder avec la fonte des glaciers. Il réclame à RWE une

indemnisation, à hauteur de sa contribution au réchauffement global, pour financer des travaux de défense le protégeant contre ces risques. Le tribunal rejette son recours en décembre 2016. Lliuya fait appel devant une cour qui n'avait pas tranché son cas début 2019. Depuis lors, Lliuya a fait des émules. Notamment aux États-Unis où une quinzaine d'actions en justice ont été lancées par des villes, des comtés et un État (Rhode Island) réclamant réparation aux compagnies pétrolières au titre des coûts d'adaptation que leur impose le changement climatique (par exemple protection des côtes menacées par la montée du niveau de la mer dans le cas de Rhode Island)<sup>2</sup>.

Dans ce genre d'affaire, il ne s'agit plus d'arrêter des projets nouveaux d'extraction d'énergie fossile, une forme classique d'activisme environnemental, mais de réclamer auprès d'émetteurs de gaz à effet de serre une réparation pour les préjudices encourus. Dans les cas cités, l'évaluation du préjudice est effectuée à partir du coût des mesures de prévention à engager. Derrière la question juridique se profile une question économique : qui doit financer les investissements à engager pour s'adapter de façon préventive au changement climatique ?

Printemps 2012. Huit cent quatre-vingt-six citoyens néerlandais s'associent dans l'organisation Urgenda afin de poursuivre l'État pour ses objectifs insuffisants en matière climatique. Le tribunal administratif de La Haye leur donne raison en juin 2015 en indiquant que l'État devrait viser une baisse de 25 % des émissions de gaz à effet de serre en 2020 relativement à 1990, alors que les mesures prises risquent de conduire à une baisse de seulement 17 %. L'État fait appel. En octobre 2018, la cour d'appel réitère son injonction à l'État de viser une baisse de 25 % des émissions de gaz à effet de serre. Elle ne fixe aucune obligation de moyens, alors que l'objectif

semble plutôt difficile à atteindre : d'après les données de l'inventaire national des Pays-Bas, les émissions des gaz à effet de serre étaient en 2017 inférieures de 12,6 % à leur niveau de 1990. L'atteinte de l'objectif impliquerait donc une diminution d'un peu plus de 11 % en 3 ans.

Dans ce cas de figure, la justice est sollicitée par un recours visant l'insuffisance présumée des actions conduites par l'État face au réchauffement. Si ce jugement fait jurisprudence, il risque de multiplier les recours contre les États, alors même qu'il n'existe aucun accord international juridiquement opposable en matière climatique. Suivant les termes de Marta Torre-Schaub, il s'agirait « d'aller au prétoire national pour résoudre un problème planétaire non réglé par le droit international<sup>3</sup> ». Mais l'affaire n'est sans doute pas terminée. Lorsque les données d'émission de l'année 2020 seront connues, début 2022, il apparaîtra sans doute que le -25 % n'aura pas été atteint. Quelle sera alors la réaction de la Cour de justice ? À une obligation d'objectif ajoutera-t-elle une obligation de moyens ou de résultat pour que son jugement soit effectivement suivi d'application ? Cette question juridique renvoie à celle, assez cruciale pour les politiques climatiques, de l'articulation entre les objectifs visés et les moyens à engager.

Il est difficile d'anticiper les conséquences effectives de cet engouement des activistes climatiques pour les tribunaux. En matière de judicialisation, les États-Unis ont une longueur d'avance. Deux cas fameux permettent de douter de la capacité effective des juges à accélérer la lutte contre les dommages sanitaires ou environnementaux.

Les grandes sociétés de tabac ont longtemps pratiqué des formes de désinformation rappelant les officines du climatoscepticisme niant l'existence de risques pourtant avérés. De

moins en moins tolérées dans les pays développés, ces pratiques se poursuivent ailleurs. Aux États-Unis, le premier recours contre les industriels du tabac remonte à 1954. C'est l'affaire Ira C. Lowe, un ancien fumeur qui poursuit devant le tribunal de Saint-Louis (Missouri) quatre compagnies de la cigarette qui ne l'ont pas averti du risque de cancer dont il est atteint. Les cas vont ensuite se multiplier. Dans les années 1990, les États se mettent de la partie et poursuivent à leur tour les industriels de la cigarette au titre des dépenses indues de santé publique. Ils obtiennent un accord en 1998 qui leur promet une indemnisation de 206 milliards de dollars sur 25 ans. En 2006, la Cour suprême des États-Unis tranche en faveur des plaignants de l'action collective engagée en 1974 par Howard Engle. Dans la décennie suivante, les industriels sont condamnés à des sommes records. Et pourtant... les géants de l'industrie du tabac se portent plutôt bien en 2019. Ils sont cotés à la bourse de New York (Altra) ou de Londres (Imperial Brands, British American Tobacco). Le secteur s'est consolidé, les géants de la cigarette ayant misé sur le développement des marchés émergents où les consommateurs sont nombreux, les tribunaux moins regardants et les contraintes d'information sur les risques sanitaires plus souples.

Avril 2007. La Cour suprême des États-Unis se penche sur un cas (Massachusetts v. EPA) concernant plus directement le changement climatique. Outre-Atlantique, les actions contre la pollution de l'air reposent juridiquement sur le Clean Air Act, l'une des principales lois environnementales fédérales, adoptée en 1970. Cette loi cadre donne un pouvoir réglementaire important à l'Agence fédérale de protection de l'environnement (EPA). C'est par exemple l'EPA qui a mis sur pied les standards régulant les émissions de plomb dans l'essence, celles des voitures, ou le système de lutte

contre les pluies acides, le premier à utiliser en grandeur réelle un dispositif de quotas échangeables. La question posée à la Cour suprême est de savoir si les gaz à effet de serre doivent être considérés comme un polluant et donc entrer dans le cadre des prérogatives de l'EPA<sup>4</sup>. Sa réponse positive est alors considérée comme un grand pas en avant par les partisans d'une accélération de la lutte contre le changement climatique.

Le président Obama va s'appuyer sur cette jurisprudence pour confier à l'EPA le soin de mettre en place un dispositif assez complexe pour accélérer la décarbonation du secteur électrique (Clean Power Plan). Ce dispositif sera rapidement enterré par Scott Pruitt, climatosceptique notoire, nommé par le président Trump à la tête de l'EPA début 2017. Son action éphémère (il a été contraint de démissionner en raison de ses frais de mission jugés excessifs) a principalement consisté à réduire le rôle de l'agence dans la régulation des émissions de gaz à effet de serre. Exactement comme si on revenait dix ans en arrière, avant le jugement de la Cour suprême ! La fameuse doctrine des *checks and balances* inspira les rédacteurs de la Constitution américaine qui introduisit un subtil équilibre entre les pouvoirs. Elle n'a pas permis au pouvoir judiciaire de s'opposer au détournement de la mission de l'EPA dont le patron a été nommé par le président de l'exécutif, après une audition par le Sénat qui n'a pas exercé son pouvoir de blocage.

Comme le suggèrent nos deux exemples, la judiciarisation de la question climatique est moins un gage d'accélération de l'action que le reflet de sa lenteur face à l'irréversible tic-tac de l'horloge climatique. La recherche des caractéristiques d'une politique climatique juste vise à définir des règles partagées permettant d'éviter la multiplication des contentieux.

## LES TROIS DIMENSIONS DE LA NOTION DE JUSTICE

Dans son ouvrage sur la justice climatique, Olivier Godard nous fait réfléchir à trois conceptions possibles de la justice<sup>5</sup> : commutative, réparatrice, distributive. Chacune d'entre elles apporte une pierre à l'édifice de ce que devrait être une politique climatique « juste ».

La justice « commutative » s'assure de l'honnêteté des transactions effectuées entre des partenaires. Elle établit des règles écartant les transactions qui sont injustes, par exemple en raison d'une position dominante ou d'une tricherie dans la définition d'une marchandise. En matière de droit de la concurrence, la jurisprudence repose le plus souvent sur des arguments tirés de l'analyse économique. Comme l'indique la formule « répression des fraudes » désignant en France le service de l'État en charge de cette fonction, pour être effective, la justice commutative doit évaluer et appliquer, en cas de délit, des pénalités d'un montant suffisant pour être dissuasif. Un exemple fameux de justice commutative en matière climatique concerne le jugement des fraudes intervenues en 2009 sur le marché européen des quotas de CO<sub>2</sub>.

La justice « réparatrice » (ou restauratrice) s'attache à réparer les atteintes aux droits de la victime. Elle doit évaluer les préjudices résultant de ces atteintes, puis trouver les moyens d'assurer réparation. Cela passe généralement par un transfert financier, proportionné au montant du préjudice, que le coupable doit verser à la victime. L'affaire *Lliuya v. RWE*, comme les recours des collectivités publiques aux États-Unis contre les sociétés pétrolières, s'inscrit dans cette conception. Nous y reviendrons.

La justice « distributive » s'attache aux « règles de distribution des principaux types de biens au sein d'une société », suivant la formulation de Godard<sup>6</sup>. Elle peut s'interpréter de façon procédurale.

Dans ce cas, le juge devra s'assurer qu'une répartition est juste par la seule observation des processus réglant cette distribution, sans considération des résultats atteints. Dans la réalité, elle se juge généralement en considérant également les impacts distributifs des processus mis en œuvre. On peut rattacher à ce concept de justice distributive la décision prise en décembre 2009 par le Conseil constitutionnel de censurer la taxe carbone adoptée dans la loi de finances de la même année. Le motif invoqué était en effet une « rupture d'égalité » des citoyens devant l'impôt.

## **JUSTICE COMMUTATIVE**

En matière climatique, la justice commutative renvoie à la solidité et la fiabilité de la métrique utilisée. Il faut être capable de calculer avec rigueur les émissions de gaz à effet de serre pour mettre en place des systèmes de *Monitoring, Reporting and Verification* (MRV) fiables. Grâce aux travaux du GIEC, il existe désormais un système international de normes homogènes qui peuvent être utilisées pour réaliser les inventaires nationaux évaluant les émissions des différents pays. On peut aussi utiliser ces normes pour consigner dans des registres les droits et devoirs afférant aux différents acteurs en matière de réduction des émissions. Les systèmes de MRV devraient également comporter les informations requises pour mettre en place les bonnes stratégies d'adaptation face au réchauffement du climat.

Le rôle de la justice commutative est de s'assurer de la solidité de ces règles et de leur bonne application. L'exemple des fraudes apparues en 2009 sur le système européen d'échange de quotas de CO<sub>2</sub> rappelle combien le laxisme peut coûter cher en la matière : en jouant sur les failles de la réglementation européenne en matière de



TVA, des délinquants professionnels ont subtilisé plusieurs milliards d'euros au détriment des États (fraude fiscale), difficilement récupérables devant les tribunaux. Au-delà des milliards perdus par le fisc, le coût de ces fraudes qui n'ont pourtant pas affecté l'intégrité environnementale du marché a été considérable en termes de réputation.

Sur le plan global, les accords internationaux qui fonctionnent (lutte contre la destruction de la couche d'ozone, désarmement nucléaire) ont été construits à partir de systèmes partagés de mesures et vérifications ayant fait l'objet de longues tractations. L'accord de Paris ne dispose pas encore d'un tel socle, pourtant indispensable à l'exercice de la justice réparatrice, celle que nous avons rencontrée dans l'affaire Lliuya v. RWE et sur laquelle il est utile de revenir un instant.

## **JUSTICE RÉPARATRICE**

Imaginons que toutes les victimes des impacts du changement climatique réclament réparation devant les tribunaux de leur juridiction et qu'elles obtiennent gain de cause. Chaque tribunal évaluera les préjudices et transférera le coût auprès des « coupables », c'est-à-dire les émetteurs de gaz à effet de serre. Supposons que les méthodes de calcul soient homogènes, le travail des tribunaux rapide et les sentences exécutées en temps réel. L'application de la justice réparatrice provoquera un transfert financier de l'ensemble des émetteurs, au prorata de leurs contributions respectives, vers les victimes. On aura mis en place un dispositif appliquant le principe du « pollueur-payeur ».

Dans l'exemple de Lliuya, ce système est doublement vertueux, car l'indemnisation est calculée de façon à donner aux victimes les

moyens de prévenir les préjudices. Il répare en fait le préjudice par anticipation : les villageois de Huaraz pourront par exemple ériger une digue pour se protéger de la fonte des glaces avant qu'elle ne détruise leur maison. On a en réalité financé une politique d'adaptation *ex ante* aux impacts du changement climatique. Il y a cependant fort à parier que la majorité des victimes potentielles du réchauffement ne sont pas en état d'identifier à l'avance et les risques des dommages et le calendrier des actions à mettre en œuvre pour les prévenir. Avec le temps qui passe, les tribunaux verront donc affluer des cas où les victimes vont demander réparation pour des dommages après que ceux-ci auront frappé, ce qui ne manquera pas de faire monter la facture. Si les débordements du lac Palcacocha détruisent les maisons des villageois, il faudra ajouter aux coûts de la construction de la digue ceux de la réparation des maisons du village. On retrouve ici l'observation de Stern sur la baisse des coûts des dommages que rendent possible les stratégies préventives d'adaptation ([chapitre 4](#)).

Face à la multiplication des pénalités, les émetteurs de gaz à effet de serre ne vont pas rester inactifs. Ils vont comparer le montant des pénalités infligées par les tribunaux à ce qu'il leur en coûterait de réduire les émissions. Sitôt que la facture imposée par les juges dépassera ce coût, les coupables auront intérêt à diminuer leurs émissions pour ne plus être convoqués au tribunal. Le principe du pollueur-payeur introduit par la justice réparatrice débouche ainsi sur des pénalités qui, s'accumulant, vont inciter les pollueurs à réduire leurs émissions à l'origine des dommages. À la suite d'Étienne Billette de Villemeur et de Justin Leroux, on peut imaginer qu'un marché mondial des responsabilités climatiques (*climate liabilities*) se substitue aux tribunaux pour révéler de façon incrémentale les coûts des dommages à reporter sur les émetteurs<sup>7</sup>.

Dans les deux cas, la stricte application du principe de justice réparatrice aboutirait à un transfert de charge des victimes vers les émetteurs comprenant un mécanisme d'autorégulation : du côté des victimes, les tribunaux (ou le marché des responsabilités climatiques) ajusteraient les coûts croissants des dommages climatiques pour renvoyer la facture vers les pollueurs. Du côté de ces derniers, l'affectation des coûts au prorata de leurs émissions renchérirait les procédés fortement émissifs de gaz à effet de serre. Ce renchérissement rendrait économiquement rentable la réduction des émissions.

Les conditions d'exercice d'une telle justice en temps réel, universellement accessible par des plaignants totalement informés des risques climatiques, n'existent pas. Il est peu probable qu'elles existent un jour. Mais les économistes lui ont trouvé un substitut : internaliser le coût des externalités climatiques dans les prix des biens et services échangés. Le fameux prix du carbone que nous avons déjà rencontré à plusieurs reprises. S'ils sont correctement menés, leurs calculs devraient pouvoir éviter la multiplication des recours en justice et accélérer l'action. Cette justice réparatrice permet-elle de trouver un « juste » prix du carbone ? Deux limites apparaissent immédiatement.

Du fait des multiples inerties décrites au [chapitre 2](#), les émissions des générations actuelles affecteront les générations futures. Ces générations ne peuvent pas se présenter auprès des tribunaux, soit qu'elles ne soient pas encore nées, soit qu'elles n'aient pas atteint l'âge de la majorité. De façon symétrique, une partie des dommages provoqués sur le village de Palcacocha en 2019 est à mettre au compte d'émetteurs du passé que le juge est bien en peine de retrouver. Cette première limite pose la question de l'équité intergénérationnelle.

L'autre limite concerne l'équité intragénérationnelle. Les tribunaux de notre monde imaginaire où règne une justice réparatrice parfaite vont reporter le coût des dommages sur toutes sortes d'émetteurs. Il y en aura de très gros, comme la compagnie RWE poursuivie devant le tribunal d'Essen, mais bien d'autres de beaucoup plus petite taille. Pris isolément, ces émetteurs semblent compter pour quantité négligeable. La tentation sera forte de les exempter. Ce serait une erreur car, collectivement, ils représentent une fraction élevée des émissions totales. De plus, les règles de justice doivent s'appliquer de façon universelle, sinon le travail des juges devient impossible et les contentieux inextricables. En appliquant la règle de la justice réparatrice, les juges risquent d'imputer des charges exorbitantes menaçant la survie économique de petits émetteurs. Le principe de la justice réparatrice semble alors entrer en conflit avec le troisième volet de la justice climatique : la justice distributive.

## **JUSTICE DISTRIBUTIVE**

Comme l'indique le Nobel d'économie Amartya Sen dans *L'idée de justice*, les théories de la justice distributive visent toutes « l'égalité de quelque chose – quelque chose que la théorie en question juge particulièrement crucial. Ces théories peuvent être totalement différentes (se concentrer par exemple sur l'égalité des libertés individuelles ou des revenus, des droits ou des utilités de chacun) ; elles peuvent même s'affronter. Mais elles n'en ont pas moins quelque chose en commun : elles veulent l'égalité de quelque chose<sup>8</sup>. »

En matière climatique, en quoi va consister ce « quelque chose » ? Commençons par examiner le volet intergénérationnel de

la question. Fondamentalement, il est lié au fait que le réchauffement est provoqué par le stock des gaz à effet de serre dans l'atmosphère et non par le flux annuel de nos émissions. Ceci pose une double question sous l'angle de la justice : la responsabilité des émissions historiques dont une part est le fait de générations qui ne sont plus là ; notre responsabilité vis-à-vis des générations futures qui, dans tous les scénarios, seront celles qui subiront les impacts les plus prononcés du réchauffement.

Olivier Godard traite la première question en s'interrogeant sur la prise en compte de la responsabilité historique pour la réparation des dommages et l'établissement d'un budget carbone équitable pour le futur. Si on se réfère aux lois de la physique, on pourrait établir les responsabilités des uns et des autres à partir de leurs contributions respectives à la formation du stock des gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Le principe d'égalité évoqué par Sen s'appliquerait alors au cumul des émissions passées et à venir des différents pays depuis que le cycle global du carbone est dérégulé, c'est-à-dire depuis le début de la révolution industrielle. On notera au passage que sa traduction opérationnelle obligerait à traiter le cas des migrations qui sont loin d'être secondaires sur de telles échelles historiques. Godard rejette cette règle de justice distributive. Pour lui, la responsabilité des différents pays ne peut être engagée avant 1992, année d'adoption de la Convention-cadre des Nations unies.

À cette interprétation de la responsabilité historique « longue » s'oppose de façon à peu près orthogonale le principe du « droit du grand-père » (*grandfathering*), qui a notamment inspiré le protocole de Kyoto ou les règles d'allocation initiales du système européen d'échange de quotas de CO<sub>2</sub>. La méthode du grand-père considère que le budget carbone global doit se répartir à partir d'une clé de répartition reflétant le poids de chaque émetteur lors d'une année de

référence initiale (souvent 1990). Cette clé reflète les « circonstances particulières » des pays, et en particulier leur degré de développement et leur accès plus ou moins facile aux énergies fossiles. À partir de cette méthode, le critère de justice peut s'entendre de deux façons. On peut considérer qu'il est juste de partager l'effort de réduction au prorata de cette répartition initiale : si un pays B était à l'origine du quart des émissions mondiales l'année de référence, il devra réaliser le quart des réductions d'émission demandées. Le principe d'égalité s'applique alors au poids des émissions initiales ou, ce qui revient au même, au rythme de baisse des émissions qui doit être le même pour tout le monde. Très tôt, il a semblé que cette méthode favorisait les pays riches et/ou détenant des ressources fossiles. Une alternative consiste à appliquer le critère d'égalité à une répartition cible caractérisée par une égalité des émissions par habitant. Suivant cette règle dite de *Contraction and Convergence*, passer de la situation initiale à la cible requiert des efforts bien plus importants pour les gros émetteurs initiaux<sup>9</sup>.

S'il n'est pas commode de s'accorder sur la responsabilité historique des uns et des autres, y a-t-il au moins consensus sur celle des générations actuelles vis-à-vis des générations futures ? Pas plus que celles qui nous ont précédés, ces générations ne sont présentes dans les prétoires. Quels critères utiliser pour juger du caractère juste ou injuste de l'héritage que nous allons leur laisser ? Pour l'économiste, l'outil clé permettant de naviguer dans le temps est le taux d'actualisation. L'arithmétique de l'actualisation est surprenante. Sa propriété de base est d'écraser le futur.

Supposons que le coût des dommages climatiques soit estimé à 10 000 dollars par habitant dans 100 ans. Pour une population de 10 milliards d'habitants, cela équivaldrait à 100 000 milliards de

dollars qu'il faudrait retrancher du PIB. Une grandeur pas très éloignée du PIB mondial de 2019 estimé par le Fonds monétaire international. Est-ce à dire que nos descendants auraient un PIB nul du fait de l'héritage que nous nous apprêtons à leur transmettre ? La réponse est affirmative s'il n'y a aucune croissance économique durant les 100 prochaines années. On est alors dans une logique d'effondrement. Si la croissance est en moyenne de 2 % l'an, nos descendants auront multiplié la richesse créée par un peu plus de 7. Même en défalquant le coût du réchauffement, ils seront bien plus riches que nous. La première raison qui justifie l'actualisation est le progrès économique anticipé. Pour comparer la valeur de deux grandeurs économiques éloignées dans le temps, il faut au minimum actualiser avec le taux de croissance de l'économie. Si nous actualisons nos 10 000 dollars au taux de 2 %, nous constatons que la valeur actuelle du dommage climatique dans 100 ans est de 1 400 dollars par habitant. Si chacun émet 6 tonnes de CO<sub>2eq</sub>, cela donne un prix du carbone de 233 \$/t. Peu d'économistes se prononcent aujourd'hui pour un tel niveau ! Si nous anticipons une croissance « à la chinoise » de 7 % par an, cette valeur tomberait à 12 dollars, soit un prix du CO<sub>2</sub> de 2 dollars. Une grandeur qui risque de ne pas peser bien lourd dans nos choix d'aujourd'hui.

Dans sa revue de 2006, Stern a actualisé les dommages climatiques futurs à partir d'un taux de croissance attendu de l'économie mondiale un peu inférieur à 2 %, auquel il a ajouté une prime de risque de 0,1 %. Il a beaucoup moins écrasé le futur que Nordhaus qui utilise un taux supérieur, d'où un message bien plus alarmant sur la nécessité d'agir face au réchauffement. De l'extérieur, on a l'impression d'une sorte de loterie : suivant le taux d'actualisation que les économistes sortent de leur chapeau, les

préconisations sur les politiques climatiques sont divergentes. Et la justice dans tout cela ?

Fort de son bagage d'économiste du risque et de l'assurance, Christian Gollier s'est penché sur cette question qu'il traite d'une façon non technique dans *Le climat après la fin du mois*<sup>10</sup>. Il nous rappelle que ce qui compte en matière de choix intertemporels, ce n'est pas le PIB, mais le bien-être qui intègre notamment les externalités environnementales. Or, le niveau de bien-être ne croît pas proportionnellement au PIB. Il y a de la perte en ligne, notamment en raison de la saturation des besoins. En régime de croissance, une même unité de PIB dans le futur procurera moins de bien-être qu'aujourd'hui. Sous l'angle de la justice intergénérationnelle, il convient donc d'utiliser un taux d'actualisation supérieur au taux de croissance. De combien ? Gollier n'apporte aucune réponse définitive, mais il suggère que la correction doit être significative : « Demander aux générations d'aujourd'hui de faire des sacrifices pour les générations futures, c'est un peu comme demander aux plus déshérités d'entre nous de se cotiser pour faire un cadeau à Bill Gates ! Du fait de la décroissance du bien-être marginal avec le pouvoir d'achat, ce transfert qui accroît les inégalités réduit le bien-être collectif. En d'autres termes, dans un monde à la prospérité grandissante, lutter contre le changement climatique s'oppose à la lutte contre les inégalités intergénérationnelles<sup>11</sup>. » De cette formulation provocatrice, il faut surtout retenir un point important. S'accorder sur un critère de justice entre générations éloignées dépend en premier lieu des croyances que nous avons sur les progrès futurs. En Europe et au Japon, les anticipations de croissance sont moroses et la perception de l'urgence climatique est relativement élevée ; en Asie du Sud et de



l'Est qui surfent sur un rattrapage historique de leur croissance, c'est l'inverse.

Les considérations d'équité intergénérationnelle n'aboutissent pas à une recette miracle qui nous donnerait le « juste » prix du carbone. Elles nous fournissent deux indications. Ce prix doit intégrer les coûts du réchauffement légué par les émissions des générations du passé qui ne l'ont pas internalisé dans les biens et services intenses en carbone qu'elles ont produits. Mais les générations présentes ont toutes les difficultés à s'accorder sur une clé de répartition au titre de leurs responsabilités historiques. Elles rechignent donc à payer leur quote-part de ce prix. Quand on se tourne vers l'avenir, l'héritage que les générations actuelles laisseront aux suivantes sera conditionné au premier chef par les progrès économiques futurs. Nul ne sait anticiper ces progrès. D'où la multiplication d'anticipations contradictoires qui rendent bien difficile l'accord sur un taux d'actualisation unique. Pour bien utiliser cet outil absolument indispensable, il convient d'organiser le débat sur son montant avec transparence et honnêteté.

Une difficulté supplémentaire est que, bien entendu, il n'est possible de débattre ni avec les générations qui nous ont quittés ni avec celles qui ne sont pas nées. C'est avec les générations actuelles qu'il convient de s'accorder sur des critères partagés de justice climatique.

## **LE DÉTOUR PAR RAWLS**

Lorsqu'on écoute les débats sur la justice climatique, on reconnaît vite à ses arguments la position sociale de celui qui les avance. Votre village est perché à 4 000 m dans la Cordillère des Andes, sans moyen de défense contre la fonte des glaces. Votre

argumentaire sera orthogonal avec celui du dirigeant d'une multinationale de l'électricité. L'opposition est classique, même s'il est exceptionnel qu'elle arrive jusqu'au prétoire. Quelle est votre attitude face au directeur de l'usine de Shenzhen qui vient d'acheter sa BMW et s'évade dès qu'il le peut pour des vacances familiales par le nouvel aéroport international ? Comme vous, il est né dans un village perché dans les montagnes, mais dans l'Est de la Chine. Aujourd'hui, son mode de vie le range dans le décile de la population mondiale le plus émetteur de CO<sub>2</sub>. Doit-il contribuer à votre dédommagement ? Comment voyez-vous ces « gilets jaunes » qui refusent de payer leur écot à la lutte contre le réchauffement global en bloquant le relèvement de la taxe carbone ? Dans leur lointain pays, ils se présentent comme les victimes du système. Ils sont pourtant en moyenne plus riches que les gens de votre village de montagne. Sont-ils vos alliés ou vos adversaires ?

Pour démêler cet écheveau, laissons-nous guider par les conseils de John Rawls (1921-2002), le philosophe du xx<sup>e</sup> siècle qui a le plus contribué à éclairer les questions de justice distributive. Dans sa *Théorie de la justice*, Rawls ne traite pas de la justice du monde. Il cherche à établir les règles de base à appliquer pour construire une société juste entre les citoyens d'un même État. Dans un autre ouvrage, *Le droit des gens*, il se penche même sur des règles spécifiques à la justice internationale. Rawls ne traite pas non plus de justice intergénérationnelle : « Comment partager entre les générations le poids de l'accumulation du capital et du progrès de la civilisation et de la culture est une question à laquelle, semble-t-il, il n'y a pas de réponse précise<sup>12</sup>. » Sa méthode nous semble pourtant inspirante pour la justice climatique.

Pour chercher des règles permettant de séparer le juste de l'injuste, Rawls nous recommande en premier lieu de nous mettre

dans une « position originelle » dans laquelle nous n'aurions aucune indication sur la position que nous allons occuper. Ce qu'il appelle le « voile de l'ignorance ». Pour notre cas, cela veut dire que nous pouvons aussi bien être paysan-guide dans les Andes que patron de RWE, directeur d'usine en Chine du Sud ou battant le pavé chaque samedi paré de notre gilet jaune. Réfléchir sous le voile de l'ignorance nous oblige à nous projeter dans toutes les positions sociales imaginables, des plus enviables aux plus déconsidérées.

Une fois cette disposition acquise, Rawls propose une double règle de justice qui ne peut fonctionner que si les libertés de base pour les citoyens sont respectées de façon totalement égalitaire. Sous cette condition, et sous cette condition seulement, il propose alors ses deux critères bien connus de justice distributive qui n'autorisent les inégalités économiques et sociales qu'à la condition qu'elles soient « a/ au plus grand bénéfice des désavantagés [...] b/ attachées à des fonctions et des positions ouvertes à tous<sup>13</sup> ».

Imaginez que vous puissiez vous retrouver paysan-guide dans la Cordillère des Andes, ou patron d'une multinationale occidentale, ou directeur d'usine en Chine, ou gilet jaune en Creuse, ou... Vous ne disposez d'aucun indice indiquant votre probabilité d'accès à l'une ou l'autre de ces positions. Vous avez médité les règles de Rawls. Quelles sont dès lors les règles de justice distributive qu'il vous faut ajouter à celles de la justice commutative et réparatrice ? La démarche du philosophe nous permet d'identifier deux règles majeures de justice distributive pouvant guider la génération présente.

Comme on l'a vu au [chapitre 3](#), il n'est pas nécessaire de se projeter en 2050 ou en 2100 pour observer les impacts du changement climatique. De mieux en mieux documentés, ces impacts creusent, avant toute réponse des sociétés humaines, des

inégalités injustifiables au sein de la population : les plus affectés sont fréquemment ceux qui occupent les positions les moins favorables et ont le moins contribué aux émissions de gaz à effet de serre. Comme les impacts vont s'aggraver durant plusieurs décennies, ces inégalités risquent de se creuser avec le temps, sans réponses politiques ciblées. Notre premier critère de justice distributive implique donc de veiller à ce que les actions d'adaptation au changement climatique n'aggravent pas la position des plus démunis. Pour les générations actuelles, c'est le premier enjeu de la justice climatique. Il a été sous-estimé par les économistes du climat. Il commence à remonter au prétoire au travers des cas précédemment évoqués. Si on veut éviter l'engorgement des tribunaux, il convient de réévaluer les questions d'adaptation du changement climatique. En l'absence de politiques d'adaptation ciblées sur les plus défavorisés, il ne sera guère possible de conduire des politiques d'atténuation à la hauteur des enjeux.

Nous avons déjà évoqué la deuxième règle de justice distributive. Cette règle conduit à rejeter ou corriger toute action conduite au titre de l'objectif de la réduction des émissions de gaz à effet de serre pouvant générer des inégalités nouvelles pesant sur les plus désavantagés. Et ceci, quel que soit l'instrument utilisé. Taxe carbone sans mécanisme corrigeant les effets distributifs indésirables : songeons aux gilets jaunes en France. Allocation des droits à émettre qui priverait les plus démunis d'un accès aux services énergétiques de base : songeons aux 13 % de la population mondiale privée d'un accès à l'électricité. Système de régulation par les normes, privant les plus démunis de matériels émissifs mais fournissant des services énergétiques de base : songeons aux systèmes de cuisson améliorés en Afrique. Dans le domaine de l'agriculture et de la forêt, l'application de cette deuxième règle

renvoie souvent à la question de l'inégalité des structures agraires et, dans certains cas, à celle de la prise en compte des droits des peuples autochtones.

Ainsi énoncés, ces principes restent trop généraux pour orienter l'action. En particulier l'identification des individus ou groupes sociaux que Rawls qualifie de « désavantagés » peut s'interpréter de multiples façons, chacun ayant naturellement un intérêt immédiat à se considérer comme moins bien loti que les autres ! Les économistes qui se sont penchés sur la question des inégalités nous rappellent combien ces questions sont complexes.

## **INÉGALITÉS ÉCONOMIQUES ET ÉMISSIONS DE CO<sub>2eq</sub>**

En France, une vision assez répandue dans le grand public est que la mondialisation des économies a généré un creusement tous azimuts des inégalités. On assimile mondialisation et inégalités croissantes et, par réciprocité, démondialisation et réduction des inégalités. La mondialisation devient un bouc émissaire facile à incriminer. Cette représentation alimente la vague populiste. Le seul problème est qu'elle ne concorde pas avec la réalité. La mondialisation a provoqué un double mouvement sur les inégalités dans le monde. Depuis un demi-siècle, elle a drastiquement réduit les écarts entre niveaux de vie des pays en y réduisant la pauvreté quand elle creusait des inégalités à l'intérieur de la plupart des pays.

Pierre-Noël Giraud est l'un des premiers économistes à avoir analysé ce double phénomène dans son *Inégalité du monde* paru en 1996<sup>14</sup>. Il y distingue une première phase historique dans laquelle les inégalités de niveau de vie se sont dramatiquement accrues entre pays occidentaux et Japon d'un côté et le reste du monde « en développement » de l'autre. Ces tendances s'inversent à partir des

années 1980 du fait du puissant reflux au profit des grands perdants d'hier. Dans le même temps, les inégalités qui tendaient à se refermer au sein des pays riches ont recommencé à se creuser. Les travaux de François Bourguignon et Christian Morrisson, parus dans les meilleures revues académiques, corroborent ce diagnostic<sup>15</sup>.

Sous l'angle des émissions de gaz à effet de serre, ce mouvement de flux-reflux de la création de richesse correspond rigoureusement à la dynamique des vases communicants décrite au [chapitre 1](#). La croissance des émissions mondiales de CO<sub>2</sub> est portée à peu près exclusivement par les pays d'industrialisation ancienne jusqu'aux chocs pétroliers de 1973 et 1980. Le creusement des inégalités de niveau de vie entre pays riches et pays pauvres freine alors l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre. Depuis 1980, la réduction de ces mêmes inégalités de niveau de vie est leur moteur principal de leur progression.

Examinons maintenant les inégalités à l'intérieur des pays. L'ouvrage de Piketty *Le capital au xx<sup>e</sup> siècle* est incontournable en la matière<sup>16</sup>. Piketty décortique le lien entre inégalités de revenu et de patrimoine, revenu du travail et revenu du capital. Il démasque en particulier le rôle des héritages qui contribuent à des inégalités qui contreviennent manifestement aux critères rawlsiens de justice. Il démontre avec clarté que la prétention des détenteurs de capital à obtenir des rendements durablement supérieurs au taux de croissance de l'économie conduit à un creusement invraisemblable des inégalités « par le haut », celles des 1 % qui accaparent une fraction croissante de la richesse. Ce phénomène est accentué par une autre conséquence de la mondialisation : la disparition de l'inflation sur les biens et services. L'inflation s'est déportée sur les prix des actifs – immobilier et actions – dont la valeur tend à se

déconnecter de l'économie réelle, ce qui amplifie la polarisation de richesse sur les 1 %.

Et l'impact sur les émissions de gaz à effet de serre ? En moyenne, les riches émettent en valeur absolue plus de CO<sub>2eq</sub> que les pauvres. Cela s'observe sur leurs émissions directes et encore plus sur leur empreinte carbone intégrant les émissions indirectes. Mais lorsque le revenu augmente, les émissions associées aux dépenses des ménages le font moins rapidement. L'élasticité des émissions au revenu est inférieure à l'unité. Deux mécanismes principaux sont à l'œuvre. Les phénomènes de saturation : même si Warren Buffett ou Bill Gates sont fans de Big Mac, ils n'ont qu'un estomac. Et s'ils possèdent dix voitures de sport dans leur garage, ils ne peuvent en conduire qu'une seule à la fois. L'autre frein à la croissance des émissions est l'accroissement du taux d'épargne financière à partir d'un certain niveau de revenu. Si on redistribue du pouvoir d'achat du haut vers le bas, on accroît donc mécaniquement les émissions, puisque les pauvres ont, en moyenne, une propension plus élevée à émettre que les riches. Lucas Chancel le constate dans son ouvrage sur la justice sociale et environnementale : « Certains soutiennent qu'une répartition plus égalitaire des revenus dans un pays tel que les États-Unis réduirait automatiquement les émissions nationales. Ce n'est vrai que sous certaines conditions qui ne sont pas vérifiées en pratique. En réalité, la redistribution des revenus – toutes choses égales par ailleurs – tend à accroître les émissions nationales<sup>17</sup>. » En matière énergétique, ce dilemme entre justice distributive et objectif climatique risque de s'accroître si la substitution des sources fossiles par des sources renouvelables s'opère plus rapidement chez les riches que chez les pauvres. Une sobriété énergétique s'amorçant par le haut de l'échelle des revenus pour gagner

progressivement les classes intermédiaires et basses aurait le même effet.

Dans son ouvrage *Inégalités mondiales*, Branko Milanovic synthétise les deux approches des inégalités à partir de sa fameuse courbe en éléphant. Les bénéficiaires de la mondialisation, la nouvelle classe moyenne des pays émergents, principalement asiatique, et les ultrariches occupent le dos de l'éléphant et sa trompe qui pointe en l'air. Les classes moyennes des pays riches et les laissés-pour-compte des pays moins avancés forment deux creux autour du dos de l'animal, ce qui confère ce côté très atypique à cette courbe de distribution du pouvoir d'achat. Logiquement, Chancel et Piketty retrouvent cette forme en éléphant lorsqu'ils tentent de reconstituer l'évolution des émissions mondiales de gaz à effet de serre intervenue entre le protocole de Kyoto (1997) et la conférence climatique de Paris (2015)<sup>18</sup>. Ils estiment également que 10 % des ménages les plus émetteurs, regroupés parmi les ménages à haut revenu, sont à l'origine de 45 % des émissions mondiales. La réduction de leurs émissions aurait donc un impact massif sur le total mondial, à condition qu'elle ne soit pas obtenue par un transfert de revenu vers des ménages plus pauvres qui en utiliseraient une part plus élevée pour acheter des biens fortement émissifs. Une forme particulière de l'effet rebond ([chapitre 8](#)). À court terme, on n'échappe pas facilement au dilemme entre objectif de justice distributive et atténuation du changement climatique !

Milanovic nous invite également à réfléchir à l'évolution future des inégalités économiques dans le monde. Contrairement à Piketty, il ne considère pas le creusement des inégalités comme une loi intrinsèque au capitalisme. Il interprète la montée des inégalités comme la phase montante de ce qu'il appelle les « vagues de Kuznets », du nom du Nobel d'économie qui fut le pionnier des



travaux sur les inégalités et le développement. Ces vagues montantes et descendantes se succéderaient dans des cycles longs, donnant au capitalisme son visage le plus inique sur la crête de la vague mais plus social à son creux. Il s'interroge sur les facteurs qui pourraient faire retomber la vague dans le courant du <sup>xxi</sup><sup>e</sup> siècle. Milanovic fait une distinction entre les facteurs bénéfiques et ceux néfastes. Écoutons-le : « Nous avons l'habitude d'insister sur les premiers – hausse du niveau d'éducation, baisse de la prime de qualification, hausse des attentes en matière de protection sociale –, mais les seconds sont tout à fait compatibles avec la mondialisation<sup>19</sup>. »

Au <sup>xx</sup><sup>e</sup> siècle, les deux conflits mondiaux et la grande crise de 1929 ont provoqué des chocs qui, en réaction, ont conduit à une destruction à grande échelle de capital et à un resserrement des inégalités. Ce sont les facteurs « néfastes » qui ont provoqué, en réponse, des facteurs « positifs », notamment pendant les trois décennies de l'âge d'or qui ont succédé au second conflit mondial. Au <sup>xxi</sup><sup>e</sup> siècle, la montée du risque climatique figure, avec la grande récession de 2009, parmi les chocs majeurs qui vont reconfigurer l'allure des inégalités mondiales. Ce sont les facteurs néfastes. En réaction, des politiques climatiques justes pourront constituer l'un des facteurs « bénéfiques » permettant de faire refluer la vague des inégalités. Nous examinons dans les deux derniers chapitres comment de telles politiques pourraient se mettre en place d'abord en France et en Europe, puis dans le cadre de la négociation internationale.

## CHAPITRE 11

# LA TRAQUE DU PASSAGER CLANDESTIN

Juin 2019. Le sommet du G20 s'achève sur fond de guerre commerciale entre les États-Unis et la Chine. Un communiqué annonce que l'accord de Paris est sauvé : 19 membres sur 20 ont apposé leur signature en bas du texte. Le message semble clair. Il y a, d'un côté, la majorité des pays voulant coopérer face au réchauffement et, de l'autre, Donald Trump isolé après avoir ostensiblement claqué la porte deux ans auparavant. Cette représentation simpliste serait-elle conforme à la réalité ? Parmi les signataires du communiqué, on trouve des chefs d'État au climatoscepticisme affiché, pour ne pas dire militant (Australie, Arabie saoudite, Brésil, Russie, Turquie, etc.). Autant de « passagers clandestins » embarqués dans une croisière dont ils refusent de payer le ticket et qui minent l'accord de l'intérieur.

Nous commençons ce chapitre par une histoire d'herbe et de clôtures racontée par Garrett Hardin à propos de biens communs. Elle permet d'identifier trois leviers utilisables pour déjouer les comportements de passager clandestin : l'établissement de normes ; la tarification carbone via la taxation ; l'utilisation de techniques de type plafonnement et échange de quotas.

Dans ses premières étapes, la négociation climatique a reposé sur une vision binaire, coupant le monde en deux au nom de la différenciation de la responsabilité face au réchauffement. Cette vision d'un monde avec un centre et la périphérie était en décalage croissant avec la montée en régime des économies émergentes, libres de toute contrainte. C'est la raison profonde de l'échec du protocole de Kyoto et de l'accélération des émissions mondiales de gaz à effet de serre observée durant les deux premières décennies de négociation climatique.

**Figure 11.1 La signature de l'accord de Paris**



*Les chefs d'Etat autour du Secrétaire Général des Nations Unies au moment de la signature de l'accord de Paris. Une belle unanimité de façade qui ne doit pas masquer la faiblesse de la gouvernance climatique multilatérale.*

Source : [https://www.lepoint.fr/environnement/cop-21-195-pays-tentent-de-finaliser-l-accord-de-paris-sur-le-climat-16-05-2016-2039700\\_1927.php](https://www.lepoint.fr/environnement/cop-21-195-pays-tentent-de-finaliser-l-accord-de-paris-sur-le-climat-16-05-2016-2039700_1927.php)

Relativement à Kyoto, l'accord de Paris introduit une vision à long terme et un cadre nouveau de négociation où tous les pays sont impliqués via leurs contributions nationales. Dans ce nouveau

régime, les passagers clandestins se repèrent à la faiblesse ou à l'ambiguïté de leur contribution. Pour déjouer ces comportements, il convient en premier lieu de mettre en place une métrique commune et des procédures de contrôle pour tracer les émissions de gaz à effet de serre et les flux financiers. C'est le socle de base, garant de la justice commutative.

Pour passer à une concurrence au mieux-disant en matière climatique, il convient de mettre en place des instruments réglementaires et économiques accélérant la sortie des sources fossiles sans peser sur le développement des pays moins avancés. La tarification carbone devrait jouer un double rôle : accélérer la reconversion des actifs économiques liés à la production et l'utilisation des énergies fossiles ; lever une source additionnelle assurant les transferts financiers vers les pays moins avancés au titre de la justice climatique. Comme le rappelle le rapport du GIEC sur le 1,5 °C, les dommages climatiques frappent bien avant que les 2 °C soient atteints. Pour inclure les pays vulnérables, l'accord climatique doit leur transférer des ressources suffisantes pour accroître leur résilience face aux impacts et élargir leur accès à l'énergie sans provoquer de rebond des émissions de CO<sub>2</sub>.

En l'absence d'une tarification carbone effective, le prix indicatif du CO<sub>2</sub> est une boussole permettant d'orienter les choix économiques. Ses vertus incitatives sont moindres par rapport à celles d'un prix effectif, réglé par les émetteurs. Sa bonne utilisation permettrait néanmoins de réorienter les investissements publics et d'intégrer une partie des risques climatiques dans la régulation financière.

## **UNE HISTOIRE D'HERBE ET DE CLÔTURES**

Dans son article « The Tragedy of the Commons », Garrett Hardin explique comment la gratuité d'un bien collectif peut entraîner sa destruction dans une économie marchande<sup>1</sup>. Cet article est souvent utilisé pour justifier des approches économiques préconisant la privatisation des biens communs ou l'utilisation de systèmes de quotas négociables. Nous en proposons une tout autre lecture.

Hardin appuie sa démonstration sur l'exemple historique des prés communaux. Dans l'Europe féodale, le seigneur devait concéder aux habitants un pré communal entourant chaque village, laissé en libre accès aux animaux pour la pâture. C'était une forme (très frustrante) de sécurité sociale. Ce mode d'organisation peut fonctionner en régime stationnaire. Sitôt que le nombre d'animaux augmente, il se pose un problème de régulation. Si chaque villageois n'agit que suivant son propre intérêt, il est incité à amener ses animaux à l'herbe jusqu'à épuisement du bien commun. Personne ne paie le coût d'entretien de ce bien laissé à la disposition de tous. C'est ce mécanisme qu'Hardin qualifie de « tragédie ».

Supposons qu'une partie du village, plus consciente du problème, s'organise pour réduire la pression sur le pré. L'intérêt des autres villageois est de se faire oublier, car ils bénéficieront des efforts réalisés par les premiers. Comme il y aura plus d'herbe disponible, ils pourront même accroître les prélèvements de leurs animaux, en détruisant les efforts réalisés par les autres. Ils se sont transformés en passagers clandestins, à l'image des chefs d'État qui, bien décidés à ne rien faire, ont signé la déclaration du G20 supportant l'accord de Paris pour sauver les apparences.

Si on change le mot « village » par le mot « planète » et le mot « pré communal » par le mot « atmosphère », on a l'exacte image de la question climatique : tels les villageois de Garrett Hardin, les

terriens sont en train de détruire la fertilité de leur pré communal (l'équilibre de la composition atmosphérique de l'atmosphère) en raison de la liberté et de la gratuité de son usage. Voyons maintenant les différentes solutions que peuvent trouver les villageois (les terriens) pour sauver le pré communal (parvenir à la neutralité carbone). Il y a trois voies possibles, qui correspondent à trois modes d'action pour contrer le changement climatique et déjouer les comportements du passager clandestin.

Les villageois peuvent en premier lieu s'organiser pour limiter l'accès au pré, par exemple en organisant des rotations qui limitent la liberté de conduire ses animaux à la pâture. Ils s'accordent ainsi sur des normes. S'il existe une autorité publique, par exemple un conseil de village, cette autorité aura la charge de faire respecter les normes par tout le monde. On a alors créé une norme réglementaire, similaire à celles utilisées pour limiter les rejets de polluants dans l'air ou l'eau. Le protocole de Montréal (1987) destiné à protéger la couche d'ozone repose sur l'introduction d'une telle norme prohibant l'usage des substances à l'origine du phénomène. Comme l'interdiction est respectée, le protocole de Montréal fait partie de ces accords environnementaux qui fonctionnent parfaitement, mais dont personne ne parle. Un peu l'inverse des accords climatiques !

Les normes que les villageois vont appliquer peuvent aussi résulter d'un processus de négociation décentralisé. Cette voie a été étudiée par Elinor Ostrom, la seule femme à avoir été récompensée par le prix Nobel d'économie. Ostrom a consacré sa carrière à étudier comment des acteurs pouvaient protéger des biens communs locaux sur la base de l'alignement de leurs intérêts économiques et du développement de logiques de coopération. On trouve de multiples illustrations du potentiel de ces approches « polycentriques » à l'échelle de territoires. Dans l'une de ses

dernières contributions, Ostrom s'interroge sur la possibilité d'utiliser les principes de son approche pour la gouvernance internationale du climat. Sa conclusion est qu'il faudra des recherches empiriques et théoriques pour « identifier ceux de ces principes qui pourront opérer un changement d'échelle et quels nouveaux principes devront être ajoutés<sup>2</sup> ».

Au lieu d'organiser des rotations, les villageois peuvent choisir d'établir une redevance que chacun devra acquitter pour avoir accès au pré. Ce faisant, ils appliquent le principe du pollueur-payeur rencontré au [chapitre 10](#). Il se pose alors la question de la base sur laquelle on doit calculer la redevance (le nombre d'animaux, leurs besoins alimentaires, la période de pâture, etc.) et celle de l'usage de la recette (travaux d'amélioration du pré, investissements d'intérêt général pour le village, rétrocession aux plus démunis, etc.). Ces questions sont celles qu'il faut se poser quand on veut établir une tarification environnementale. L'expérience montre que sans règles simples, équitables et connues de tous, ce type de taxation résiste mal au temps. Sitôt qu'une taxe carbone est fixée à un niveau suffisant pour induire des changements dans les décisions économiques, elle génère en effet des effets distributifs importants. Cela est vrai à l'intérieur d'un pays, mais également entre pays. Illustrons ce dernier point.

Les émissions de CO<sub>2</sub> liées à l'utilisation d'énergie fossile et à la production de ciment sont techniquement faciles à taxer. Elles ont avoisiné 37 Gt en 2018. Supposons que nous mettions en place une taxe uniforme de 27 \$ sur chaque tonne de CO<sub>2</sub> émise dans le monde. Nous créons une recette de 1 000 milliards de dollars par an. Si chaque pays encaisse le produit de la taxe, il n'y a par définition aucun transfert financier entre pays. Mais une taxe de 27 \$/t représente un coût relatif par rapport aux biens et services

échangés bien plus élevé dans les pays pauvres que dans les pays riches. À ce prix, on peut fermer les cimenteries en Inde et cesser d'approvisionner de nombreuses villes africaines en électricité. Ces pays s'opposent à une telle mesure au nom de l'équité. Que se passerait-il si on redistribuait le produit de la taxe de façon égalitaire entre les citoyens du monde ? Mille milliards pour une population de 7,6 milliards, cela fait 130 dollars par habitant. Les gros émetteurs seraient contributeurs au système, car ils paieraient plus de 130 dollars en taxe carbone, et réciproquement pour les petits émetteurs. En 2018, un tel système aurait coûté en moyenne 314 dollars à un Américain, 160 dollars à un Chinois et 55 dollars à un habitant de l'Union européenne, mais aurait rapporté en moyenne 78 dollars à un Indien et 112 dollars à un Africain au sud du Sahara. Multiplions par les populations concernées : 107 milliards qui entrent en Inde et 117 milliards en Afrique au sud du Sahara. Beaucoup plus que le total de l'aide au développement qu'ils reçoivent ! Ce ne sont plus les pays pauvres qui s'opposent au dispositif, mais les riches qui refusent maintenant de mettre la main au porte-monnaie. S'accorder sur des mécanismes distributifs est la difficulté majeure rencontrée dans la construction d'un accord climatique international.

La troisième voie pour restaurer la fertilité du pré communal consiste à distribuer des droits de propriété. C'est celle qui a été historiquement empruntée, d'abord au Royaume-Uni puis en Europe continentale, avec le mouvement des *enclosures* qui favorisa l'accroissement de la productivité agricole au seuil de la révolution industrielle. Le terme indique que les nouveaux propriétaires du pré communal se sont empressés de clôturer leurs parcelles pour empêcher les animaux du village d'y pénétrer. Le système des quotas cessibles est un mécanisme qui n'est pas sans lien avec ce mécanisme historique. Il ne concerne pas des droits de propriété,



mais des droits d'usage sur le bien commun. Dans le cas du climat, il s'agit de plafonner l'utilisation de l'atmosphère comme réservoir pour les rejets anthropiques de CO<sub>2</sub>. Une fois ce plafond (*cap*) établi par l'autorité publique, on rend cessibles ces droits sur un marché (*trading*). D'où l'expression couramment utilisée par les spécialistes de *cap and trade*. De tels dispositifs ne créent pas des droits à polluer. Ils plafonnent un droit qui, auparavant, était illimité. Le mécanisme économique de base est que plus la contrainte de rareté créée par le plafond est forte, plus le prix du CO<sub>2</sub> va augmenter.

Comme pour la redevance, la mise en place de quotas cessibles engendre des effets distributifs qui dépendent du mode de distribution des droits et notamment de l'utilisation ou non de la « règle du grand-père », également rencontrée au [chapitre 10](#). De tels systèmes de tarification du carbone à partir de mécanismes de quotas ont été privilégiés durant les premières étapes de la négociation climatique, avec des résultats bien en deçà des attentes initiales.

## **L'IRRUPATION DU CLIMAT DANS LA VIE INTERNATIONALE**

La plupart des problématiques environnementales pénètrent dans la vie de la cité à la suite d'actions de citoyens affectés par les nuisances environnementales. Ces actions prennent des formes différentes suivant les contextes politiques et sociaux. Leur fondement se ramène toujours à des questions très concrètes liées aux modes de vie : quand on ne peut plus emmener sans danger ses enfants à l'école car l'air de la rue est vicié, on se mobilise, en général avec l'appui d'une ONG environnementale dont c'est la fonction sociale. Le climat n'a pas pénétré l'espace collectif par cette

voie. Ce sont les scientifiques qui ont sonné l'alerte à l'origine de l'irruption du climat dans la vie internationale.

Le processus démarre en 1988 avec la création du GIEC. Nous sommes à la fin de la décennie 1980. Le monde amorce la grande bascule qui va déplacer le centre de gravité de l'économie mondiale vers les pays émergents. Les dirigeants politiques qui vont accélérer le mouvement en promouvant la libéralisation des marchés, notamment ceux de capitaux, se nomment Donald Reagan et Margaret Thatcher. Ils n'ont pas vu les signes avant-coureurs du grand rééquilibrage économique au profit des émergents. Leur obsession est de gagner la guerre froide en faisant chuter l'Union soviétique. Ils perçoivent l'activisme écologique comme une menace. Au G7 de Toronto de juin 1988, ils appuient le principe de la création du GIEC, un réseau d'évaluations scientifiques indépendantes sur le climat pour éclairer les décideurs publics. Dans leur perception, ce sera un contre-feu efficace contre les activistes du climat. La suite de l'histoire leur donnera tort : les diagnostics du GIEC ne cesseront d'alerter les décideurs sur la gravité du risque climatique.

Le GIEC est créé en novembre 1988. Sous l'impulsion de son premier président, le météorologue suédois Bert Bolin, le premier rapport d'évaluation du GIEC est publié en 1990. Son message est limpide : « Le présent rapport résume ce que nous savons en 1990. Les recherches ultérieures approfondiront nos connaissances et exigeront de fréquentes mises à jour du rapport, mais les conclusions de base concernant la réalité du renforcement de l'effet de serre et de son incidence sur l'évolution du climat ne risquent guère d'en être sensiblement modifiées. Néanmoins, la complexité du système peut nous réserver des surprises<sup>3</sup>. »

Deux ans après la publication du premier rapport est signée à Rio de Janeiro la Convention-cadre des Nations unies sur le climat de 1992. Cette Convention reste, en 2019, le cadre dans lequel se déroule la négociation internationale climatique. À peu près tous les pays du monde l'ont ratifiée, y compris les États-Unis. Elle a introduit un mode de gouvernance très particulier, décrit en détail par Stefan Aykut et Amy Dahan dans leur ouvrage de référence *Gouverner le climat*<sup>4</sup>. Cette gouvernance repose sur un processus continu de négociation, avec un rendez-vous annuel dans le cadre de la COP (Conference of the Parties), l'organe suprême de la Convention, où les décisions se prennent au consensus. Lorsque les négociateurs ne parviennent pas à s'accorder, il n'y a pas de décision et un nouveau groupe de travail est généralement créé. Ceci peut déboucher sur ce que Aykut et Dahan appellent le « schisme de réalité » : la multiplication des forums où sont débattues des positions dont on ne comprend plus très bien le lien avec la réalité.

Outre la reconnaissance du caractère anthropique des changements climatiques, la Convention Climat recommande de viser la stabilisation de la concentration de gaz à effet de serre dans l'atmosphère pour limiter les interférences climatiques trop dangereuses. En 1992, cet objectif était très vague dans l'esprit des décideurs politiques. L'accord de Paris lui a donné un peu plus de consistance, en traçant la perspective de la neutralité carbone. La Convention Climat introduit enfin le principe de responsabilité « commune mais différenciée ». La différenciation de la responsabilité se rapporte plus précisément au degré de développement des pays, la règle posée étant que la mise en œuvre de la Convention ne doit pas affecter le droit au développement des pays les plus pauvres. C'est donc un principe de justice climatique

parmi les moins contestables qu'on puisse énoncer, mais dont le mode d'application a été très contreproductif.

## **KYOTO ET LE PASSAGER CLANDESTIN**

En listant dans l'[annexe 1](#) les pays riches et en transition vers l'économie de marché, la Convention Climat interprète le principe de différenciation de la responsabilité de façon binaire : d'un côté, les pays de l'[Annexe 1](#) qui portent la plus grande partie de la responsabilité. De l'autre, le reste du monde que la Convention considère comme moins responsable, voire non responsable. Cette vision binaire va être gravée dans le marbre avec le protocole de Kyoto, premier texte d'application de la Convention Climat, qui est adopté lors de la COP3 de décembre 1997 et entre en vigueur en février 2005, à la suite de sa ratification par la Douma à Moscou.

Le protocole de Kyoto introduit une obligation, juridiquement contraignante, de réduction de 5 % des émissions de six gaz à effet de serre (CO<sub>2</sub>, méthane, protoxyde d'azote et trois gaz fluorés) entre 1990 et la période 2008-2012. Seuls les pays d'industrialisation ancienne et ceux de l'ex-bloc soviétique sont concernés. Nommément désignés dans l'Annexe B du protocole, ils ont des obligations différenciées, les pays de l'ex-bloc soviétique ayant obtenu des conditions très favorables comparativement aux États-Unis, à l'Europe et au Japon. L'obligation concerne les rejets de gaz à effet de serre sur le territoire de chaque pays. Dans le secteur du ciment, la France comptabilise par exemple les émissions de CO<sub>2</sub> de toutes les cimenteries opérant sur son territoire. Elle n'est pas redevable des émissions du groupe Lafarge en dehors de ses frontières. De façon symétrique, une partie de ses émissions de ciment est le fait de groupes détenus par des capitaux étrangers.

Pour atteindre ses objectifs, le protocole de Kyoto n'impose aucune obligation de moyens aux pays concernés. Il met en place des instruments de flexibilité qui consistent à transposer au niveau mondial les techniques de *cap and trade* expérimentées quelques années auparavant pour réguler les rejets de SO<sub>2</sub> des centrales thermiques aux États-Unis.

Réduire ses émissions a un coût, qui peut différer d'un pays à l'autre. Afin de réduire ce coût, le Protocole prévoit que les pays de l'Annexe B peuvent échanger entre eux leurs droits à émettre. S'il est par exemple plus coûteux de réduire les émissions aux États-Unis qu'en Russie, les premiers auront la possibilité d'acheter des quotas aux seconds. L'idée est de faire émerger un marché international de quotas permettant de réaliser les réductions d'émission là où elles sont les moins coûteuses. Ce marché n'a pas réellement fonctionné à cause du retrait américain et de la surallocation des pays de l'ex-URSS. Il a poussé l'Europe à créer son propre marché du carbone pour les grandes installations industrielles dont le fonctionnement sera examiné au [chapitre 12](#).

Ce système d'obligations unilatéral présente un risque de délocalisation des émissions depuis les pays de l'Annexe B vers le reste du monde qui n'est soumis à aucune obligation. C'est ce qui a conduit les concepteurs du Protocole à ériger deux mécanismes de projets, fonctionnant non plus suivant une logique de rationnement mais reposant sur celle de la compensation. Le plus important est le « Mécanisme pour un développement propre » qui permet à un pays de l'Annexe B d'utiliser des réductions d'émission obtenues dans un pays en développement pour atteindre ses engagements. Par exemple, s'il est moins coûteux de réduire les émissions provenant de la gestion de décharges au Brésil, la France pourra investir dans des méthaniseurs au Brésil, calculer les gains d'émission en

résultant et utiliser les crédits correspondants pour sa conformité au titre de ses engagements Kyoto. L'échange ne porte plus sur des droits à émettre mais sur des réductions d'émission certifiées. L'incitation économique repose sur la valeur des crédits d'émission, les *offsets* disent les praticiens, tributaire de la rareté initialement introduite par la mise sous quotas des émissions.

Très séduisant sur le papier, le système Kyoto n'a pas délivré les résultats attendus pour deux raisons principales.

La première est la mauvaise application du principe de justice climatique qui a conduit Kyoto à couper le monde en deux. En exonérant de toute obligation le monde hors Annexe B, Kyoto a accordé à une majorité de pays un droit illimité à accroître les émissions de gaz à effet de serre. Il a en quelque sorte légitimé le statut de passager clandestin, comme l'a souligné Jean Tirole dans son rapport sur la question<sup>5</sup>. Dans l'esprit des promoteurs du Protocole, ce droit n'était donné qu'à titre transitoire, jusqu'en 2012. Une seconde période d'application du Protocole devait élargir le nombre des pays s'engageant à réduire leur émission. Mais comme les pays n'ont pas réussi à se mettre d'accord sur l'élargissement des engagements lors de la COP de Copenhague (2009), la liberté de manœuvre des passagers clandestins est restée totale jusqu'à l'accord de Paris (2015).

Rétrospectivement, cette faiblesse intrinsèque du protocole de Kyoto semble si évidente qu'on peut se demander comment ses concepteurs ne l'ont pas anticipée. En réalité, le monde selon Kyoto reflète une représentation binaire encore dominante au début des années 1990 : il y a au centre le monde développé, où tout se joue, et sa périphérie. Une représentation forgée sur le monde d'hier, celui d'avant la décennie 1980, où l'empilement des sources d'énergie fossile concernait exclusivement les pays d'industrialisation

ancienne. Les responsables de l'époque ne voyaient pas la force de la vague redistribuant la richesse vers les émergents, déplaçant du même coup le centre de gravité de l'économie mondiale. Ce décalage croissant entre les dynamiques économiques à l'œuvre et la rigidité de la gouvernance climatique est à l'origine du « schisme de réalité » évoqué par Aykut et Dahan. Un schisme attesté par l'accélération de la trajectoire des émissions mondiales observée durant les deux premières décennies de mise en œuvre de la Convention Climat.

La seconde raison de l'échec du protocole de Kyoto est que d'autres voyageurs clandestins sont venus s'ajouter aux passagers de la première heure : les États-Unis qui ne sont jamais vraiment entrés dans le système, faute de ratification du Protocole par le Sénat ; l'Australie et le Canada dans une série de *stop and go* reflétant le rythme de leurs alternances politiques intérieures ; la Russie, grande spécialiste des effets d'aubaine depuis le démarrage de la négociation. Tous ces pays, théoriquement contraints par Kyoto dans le projet initial, ont su se défaire de leurs obligations. Leur point commun est l'importance de leurs ressources en énergie fossile, celle dont il est si urgent de se débarrasser et qui n'est pourtant jamais explicitement mentionnée dans le texte des accords climatiques. Ce mot tabou n'apparaît pas dans l'accord de Paris, pourtant susceptible de redistribuer les cartes.

## **LES PROMESSES DE L'ACCORD DE PARIS**

Le sort d'un accord climatique se scelle en deux temps. Il faut d'abord trouver le consensus sur un texte, lors d'une COP qui, rappelons-le, réunit quelque 195 parties, c'est-à-dire l'ensemble des pays du monde. Une fois le texte adopté, s'engage le processus de

ratification par les différents pays. L'accord n'entre en vigueur que lorsque le nombre de ratifications requis est atteint. Cela a pris 2 ans pour la Convention Climat de 1992, 8 ans pour le protocole de Kyoto, à peine plus de 10 mois pour l'accord de Paris. Un record de célérité qui s'explique en partie par la forme juridique de l'accord qui a permis sa ratification par le président Obama (juin 2016) sans passer par le Sénat qui l'aurait très vraisemblablement rejeté.

Ce qu'un président peut faire, un autre peut le défaire. Un an après la ratification de l'accord par Obama, Donald Trump annonçait le retrait des États-Unis qui formellement ne sera effectif qu'en 2021 compte tenu des règles de la procédure. L'accord de Paris a donc établi deux records : celui qui entre en vigueur le plus rapidement, mais également celui que l'un de ses principaux signataires a quitté le plus vite ! Ce retrait n'a pas provoqué d'effet boule de neige, ce qui a préservé l'une des caractéristiques importantes de l'accord de Paris : son côté (presque) universel.

L'accord de Paris constitue une deuxième tentative, à la suite de l'impossibilité d'élargir les engagements du protocole de Kyoto, de mettre en application les principes de la Convention de 1992. Contrairement à Kyoto, Paris voit loin : la neutralité carbone avant la fin du siècle pour le 2 °C, si possible d'ici 2050 pour viser le 1,5 °C. C'est un premier dépassement de la logique de Kyoto dont l'horizon temporel s'arrêtait en 2012. Il est important, car on ne peut pas construire un accord climatique qui fonctionne sans un horizon à long terme mobilisateur.

Deuxième innovation de l'accord de Paris : la mise en place d'un système remontant d'engagements que les économistes qualifient de type « *Pledge and Review* ». Chaque pays détermine, de façon unilatérale, des objectifs qu'il pense pouvoir atteindre : les « contributions nationales déterminées », répertoriées dans un



registre tenu au secrétariat de la Convention. Ce sont plus des promesses que des engagements au sens strict du terme. La grande nouveauté par rapport au monde de Kyoto est que l'ensemble des pays sont invités à déposer de telles contributions. On dépasse ainsi la représentation binaire accordant le statut de passager clandestin à la partie du monde la plus dynamique sur le plan économique. Tous les grands pays émergents ont déposé une contribution, ce qui est une avancée majeure, mais fragile. Chaque pays a intérêt à afficher des promesses peu engageantes. Un peu comme au rayon d'un supermarché, les parties à l'accord ne sélectionnent, au démarrage, que les ingrédients qui les arrangent pour la corbeille commune. Dans le cas des pays émergents, les contributions, calculées de façon relative, autorisent la poursuite de l'accroissement des émissions. D'une façon plus générale, un tel système ne prémunit pas contre les passagers clandestins qui peuvent se cacher derrière le flou ou l'ambiguïté de leurs contributions.

Il subsiste par conséquent un écart important entre les contributions déposées et les cibles à long terme. Nous l'avons rencontré dans le rapport spécial du GIEC sur le 1,5 °C, dans les scénarios énergétiques de l'AIE ou encore dans le rapport *Emission Gap* qui est publié chaque année avant la COP. Le pari de l'accord de Paris est que le nouveau cadre de coopération fasse émerger en matière de politiques climatiques une concurrence vertueuse qui pénalise le « moins-disant » et récompense le « mieux-disant<sup>6</sup> ». Une telle dynamique permettrait d'accroître graduellement l'ambition des contributions déposées par chaque pays dans la corbeille commune pour rejoindre une trajectoire d'émission limitant le risque d'un réchauffement moyen supérieur à 2 °C, voire à 1,5 °C.

Pour y parvenir, l'accord prévoit un calendrier quinquennal de révisions, avec un processus comportant un effet de cliquet : chaque parti peut accroître l'ambition de sa politique climatique, mais jamais réviser à la baisse sa contribution. Ce processus en est à ses débuts. Le premier jeu de contributions couvre la période 2020 à 2025. Un premier bilan doit être réalisé en 2023, avant le lancement de la nouvelle période quinquennale 2025 à 2030. Examinons maintenant les dispositions de l'accord qui vont inciter les pays à rehausser l'ambition de leur politique.

Le premier levier est la constitution d'un cadre commun de transparence dans lequel les parties devront rendre compte de leurs contributions. Ce cadre doit être public et même bénéficier d'une certaine publicité. L'idée est qu'un pays jouant au passager clandestin risque de s'exposer aux risques de baisse de réputation. En clair, il s'agit de mettre en place une métrique commune fiable permettant de positionner clairement ce que chacun fait ou ne fait pas en matière climatique. L'importance de cette première étape posant le socle de tout accord est souvent sous-estimée.

La réorientation des flux financiers qui doivent s'aligner avec les objectifs climatiques figure en bonne place dans l'accord de Paris. Elle comprend un objectif préexistant de transfert minimal de 100 milliards de dollars par an vers les pays moins avancés pour renforcer leur capacité en matière d'atténuation et d'adaptation au changement climatique. À l'instar des contributions nationales, cette promesse ne peut être révisée qu'à la hausse. À première vue, une somme de 100 milliards semble élevée : à supposer qu'elle s'ajoute aux transferts existants, elle accroîtrait de deux tiers le montant de l'aide publique au développement (153 milliards en 2018). Cent milliards de dollars ne représentent pourtant que 0,1 % du PIB mondial. C'est très modeste comparativement aux transferts

économiques provoqués par les variations du prix du pétrole ou celles des taux de change entre monnaies. C'est également écriqué si on se réfère aux besoins en capital des pays moins avancés pour accéder aux services énergétiques de base et faire face aux impacts du changement climatique.

L'accord ne prévoit aucun instrument économique et financier nouveau, ce qui le différencie à nouveau du protocole de Kyoto. Concernant les flux financiers, il se contente de lancer un appel à la générosité pour abonder le Fonds vert pour le climat, un outil préexistant à l'accord, au mode de gouvernance particulièrement complexe. Concernant les autres instruments, il ouvre la possibilité aux parties qui le souhaiteraient de mettre en place des instruments, économiques ou autres, pour accélérer les transitions. Cette formulation inscrite à l'article 6 de l'accord est restée suffisamment générale pour n'engager à rien. Une condition requise pour obtenir le paragraphe des 195 parties au bas du texte !

Avec l'accord de Paris, nous quittons le monde binaire de Kyoto. Nous entrons dans un monde plus complexe. À l'opposition entre le centre et la périphérie s'est substitué un monde tripolaire. À son centre, on trouve la classe moyenne des pays émergents qui regroupe les forces économiques montantes et la majorité de la population mondiale. Au sein de ce groupe, les grands pays asiatiques sont devenus les acteurs clés de la négociation. Aux deux extrémités se trouvent les pays moins avancés et ceux d'industrialisation ancienne qui regroupent chacun une population de l'ordre du milliard d'habitants. À cette typologie de la richesse économique, il faut ajouter deux groupes qui occupent une position particulière dans la négociation : les pays abondamment dotés en énergie fossile et ceux couverts de forêts tropicales. Pour ces deux groupes de pays, la négociation climatique implique de renoncer aux

bénéfices à court terme de l'exploitation d'un capital qui ne résulte pas d'un effort d'épargne et d'investissement, mais d'une rente héritée de la géographie. Deux groupes particulièrement sujets aux comportements de passager clandestin.

Si l'architecture de l'accord de Paris se met en phase avec les changements du monde, il ne pose qu'un cadre que ses différentes parties peinent à remplir. Pour tenir ses promesses, il devra intégrer les trois dimensions de la justice climatique analysées au [chapitre 10](#).

## **L'ENJEU D'UNE MÉTRIQUE COMMUNE**

Quand on négocie un accord de réduction des armements, une très grande partie de l'énergie des négociateurs est dépensée pour s'accorder sur un dispositif impartial de comptage (combien de missiles balistiques ? sur quels sites ? pour quelle puissance de feu ?...) qui soit contrôlable (détection par les satellites, vérificateurs indépendants, accès possibles aux différents sites...) et comporte des procédures à mettre en œuvre en cas de soupçon de non-respect de l'accord.

Il en va de même pour les accords environnementaux qui fonctionnent. Pour s'en convaincre, le lecteur peut se reporter aux textes d'application du protocole de Montréal sur l'interdiction des substances détruisant la couche d'ozone. Il y découvrira ses innombrables annexes décrivant dans le détail la composition moléculaire des différents gaz et leurs propriétés néfastes sur la couche d'ozone.

Le premier jalon pour faire de l'accord de Paris un véritable accélérateur de transition consiste à mettre sur pied un tel système de *Monitoring, Reporting and Verification* (MRV). Ce jalon répond à

la dimension de justice commutative définie au [chapitre 10](#). Il est souvent considéré comme purement technique. Un passage obligé dont peuvent bien se débrouiller les experts, une fois que les politiques ont tranché les grandes orientations. C'est une erreur magistrale. Le déploiement d'un système transparent de MRV se heurte à des obstacles fondamentalement politiques. On ne construit pas la confiance entre des partenaires qui n'ont pas d'inventaire des gaz à effet de serre fiable et régulièrement mis à jour (la majorité des pays en développement), pour qui l'inventaire est un secret d'État (cas de la Chine) ou qui jouent sur la marge d'incertitude des calculs pour réclamer des avantages disproportionnés en matière de crédits forestiers (cas de la Russie ou de l'Australie).

Cette discussion sur la MRV est en bonne place dans l'agenda des COP depuis l'entrée en vigueur de l'accord de Paris. Elle a abouti à un point d'étape à la COP24 sous la forme de ce que les spécialistes appellent le « Katowice Rulebook<sup>7</sup> ». Il ne s'agit que d'une ébauche, encore bien éloignée du dispositif de MRV dont on a besoin.

Le premier pilier de la MRV concerne la publication, à cadence annuelle, d'inventaires des émissions de gaz à effet de serre, suivant les normes de calcul standardisées, validées par le GIEC. Ces inventaires doivent pouvoir être contrôlés par des vérificateurs indépendants, agréés par le secrétariat de la Convention. Cette règle existe pour les pays de l'[Annexe 1](#) et est appliquée. L'accord de Paris suggère qu'elle doit graduellement s'appliquer à l'ensemble des pays, sans préciser le calendrier et en soulignant le cas spécifique des petits États insulaires et des pays moins avancés. C'est un progrès relatif par rapport au monde de Kyoto qui dispensait les pays hors [Annexe 1](#) de pratiquement toute obligation de reporting. Il faut aller plus loin.

En matière d'atténuation, l'organisme onusien ne peut se limiter à un rôle passif d'enregistreur statistique. Il doit mettre en place un dispositif qui quantifie avec précision l'objectif de neutralité carbone, le traduise en objectifs intermédiaires cohérents pour les pays émetteurs et permette de juger, année après année, des progrès réalisés pour l'atteindre. Ce dispositif doit inclure les émissions liées aux transports internationaux qui sont exclues du dispositif actuel pour de navrantes raisons de compétition entre institutions des Nations unies. Tant qu'on ne dispose pas d'une telle métrique commune, l'objectif de neutralité carbone reste un slogan. Les parties à l'accord peuvent continuer à jouer au passager clandestin avec des contributions molles ou ambiguës.

Sur le plan technique, ce jeu d'inventaires est facile et peu coûteux à construire pour les émissions résultant de l'usage des énergies fossiles et de l'industrie. Ce n'est pas le cas pour celles liées à l'agriculture et la forêt et pour l'évaluation des puits de carbone. Même si l'imagerie satellite permet d'énormes progrès, on se heurte ici à la complexité du monde vivant. La deuxième jambe de la neutralité carbone, dont on a vu toute l'importance au [chapitre 9](#), exige qu'on investisse plus de moyens pour incorporer les puits de carbone et les émissions de l'agriculture dans le système des inventaires.

Le second volet de la MRV concerne la réorientation des flux financiers dont l'accord de Paris souligne l'importance. Les objectifs de transferts financiers ne constituent que l'un des volets de cette réorientation, mais représentent un enjeu crucial pour l'adhésion des pays en développement. En l'absence d'une métrique partagée, l'objectif des 100 milliards de dollars fait l'objet de communications multiples et contradictoires. Les pays riches ne manquent pas de faire une communication éhontée sitôt qu'ils abondent (ou le plus

souvent promettent d'abonder) de quelques dizaines de millions l'un des fonds mis en place dans le cadre des accords climatiques. Les pays pauvres rétorqueront toujours que « Ce n'est pas assez ». Pour mettre fin à ce sempiternel jeu de rôle, il faut disposer d'un système qui trace les flux et permette de juger de leur caractère additionnel. La bonne façon de procéder nous semble être d'éviter la création d'un nième groupe de travail dans le cadre de la Convention Climat qui n'a pas les compétences requises. Il conviendrait de confier un mandat à l'une des grandes organisations multilatérales disposant de ces compétences : FMI ou ODCE. Ce mandat inclurait une obligation annuelle de reporting à la COP pour examiner la réalité des transferts opérés au titre de la justice climatique.

Pour contrer les réticences des politiques à accepter un système contraignant de MRV, l'appel à la bonne volonté et les menaces de perte de réputation mentionnés dans l'accord de Paris sont sans doute un peu courts. C'est pourquoi nous avons proposé un mécanisme incitatif d'amorçage assez simple : le bonus-malus carbone international, basé sur le même principe que le bonus-malus écologique utilisé en France lors de l'achat d'automobiles<sup>8</sup>. Si, par habitant, un pays émet moins que la moyenne mondiale, disons 4 tonnes d'équivalent CO<sub>2</sub> pour une moyenne de 6, il dispose d'une créance de 2 tonnes ; réciproquement, si un pays excède la moyenne de 2 tonnes, il a une dette d'un même montant. Le bonus-malus se calcule en appliquant un prix de la tonne de CO<sub>2</sub> à ces quantités et en les multipliant par le nombre d'habitants. Les pays fortement émetteurs devront régler leur dette calculée à partir de leur excès d'émission relativement à la moyenne mondiale ; les pays faiblement émetteurs pourront faire valoir leur créance s'ils acceptent de rentrer dans le système partagé de MRV.

Un tel système repose sur le consentement à payer des pays à haut niveau d'émission par tête et sur l'engagement par les récipiendaires de rejoindre le système commun de MRV. Il pourrait être mis en place avec un prix initial du CO<sub>2</sub> très modeste, car l'objectif n'est pas la tarification de l'externalité climatique. Avec un prix du CO<sub>2</sub> de 1 dollar, le dispositif permettrait de transférer une somme supérieure à 10 milliards de dollars si tous les pays participaient. Bien suffisant pour financer un système de MRV très sophistiqué. Avec un prix de 7 dollars, on avoisinerait les 100 milliards. L'hypothèse du bonus-malus nous révèle aussi le potentiel distributif de la tarification carbone.

## **DU BON USAGE DE LA TARIFICATION CARBONE**

Le deuxième critère de justice climatique identifié au [chapitre 10](#) consiste à appliquer le principe du pollueur-payeur, en faisant porter le coût de la transition bas carbone aux émetteurs de gaz à effet de serre. Ce principe est parfois interprété comme conduisant automatiquement à une tarification carbone. Le raccourci est trop rapide.

En premier lieu, le [chapitre 9](#) nous a montré que la tarification carbone n'était pas un outil adapté au secteur de l'agriculture et de la forêt. Pire, son application dogmatique à la gestion forestière pourrait provoquer de graves déconvenues. Par exemple exploiter la ressource énergétique de la forêt tropicale au détriment de son réservoir de biodiversité. Les instruments économiques favorisant le réinvestissement dans la diversité du vivant sont plus à rechercher du côté du paiement pour services environnementaux (en intégrant la fonction de stockage du CO<sub>2</sub>) que de la tarification carbone.



Ce sont les émissions résultant de l'usage des énergies fossiles qui constituent le champ d'application majeur de la tarification carbone. Statistiquement, elles représentent deux tiers des émissions mondiales. Un bon accord climatique doit permettre d'accélérer la sortie des énergies fossiles. Une telle accélération peut résulter d'instruments réglementaires et/ou d'instruments économiques. Si on a toute confiance dans les économistes, on n'utilisera que les seconds. Ce serait peut-être prendre quelques risques ! Nous préconisons donc de mettre deux fers au feu, en espérant que les conditions futures permettront de privilégier les instruments économiques, plus efficaces pour viser des cibles ambitieuses de décarbonation.

Il n'y a aucune raison objective pour que l'accord climatique n'utilise pas, pour les sources fossiles, les méthodes réglementaires que le protocole de Montréal a appliquées aux substances détruisant la couche d'ozone. Seule la crainte de heurter de front l'intérêt des pays concernés a introduit une sorte d'angle mort, véritable tabou dans la négociation climatique. Examinons comment une telle démarche devrait être conduite de façon réaliste. On pourrait inscrire deux points à l'ordre du jour : le retrait du charbon pour produire de l'électricité ; un durcissement de l'octroi des concessions pétro-gazières. Concernant le charbon, la première mesure serait d'interdire toute construction de nouvelle centrale électrique à charbon non munie d'un dispositif opérationnel de capture et stockage du CO<sub>2</sub>. Ce premier pas serait suivi de l'établissement d'un calendrier fixant l'arrêt graduel des centrales ne répondant pas à des normes d'émission de plus en plus exigeantes dans le temps. Concernant l'exploration pétro-gazière, il conviendrait d'interdire toute nouvelle attribution de permis d'exploration d'hydrocarbures en Arctique et autres zones sensibles comme la forêt tropicale ou

certaines zones marines. La réglementation introduirait ensuite un calendrier d'arrêt des permis d'exploitation. Techniquement, ces réglementations poseraient plutôt moins de problèmes que celles des gaz CFC dans le monde. Elles pourraient donc intervenir plus rapidement si on parvenait à un accord politique entre les parties.

Pour avancer dans cette direction, il convient de confier un mandat de négociation à une instance multilatérale compétente, avec obligation de rapporter chaque année devant la COP. Le bon candidat est l'AIE dont la gouvernance pourrait au passage être revue pour mieux intégrer les pays en développement dans les instances de pilotage. Comme dans le cas du retrait des gaz CFC, les dispositions financières accompagnant ces mesures sont la clé de l'obtention d'un compromis acceptable pour les pays les plus affectés. Si un compromis n'est atteint qu'avec une partie des participants, des mesures de protection de l'accord vis-à-vis des tierces parties devront être envisagées.

Ces mesures réglementaires ne seront que des garde-fous si on parvient à utiliser correctement la tarification carbone. Il ne fait en effet aucun doute qu'il serait bien plus efficace de sortir le charbon de la production électrique mondiale et d'accélérer l'arrêt de l'exploration pétro-gazière à l'aide d'un prix international du CO<sub>2</sub> s'appliquant à tous. La vertu première d'un tel prix est en effet de renchérir à la fois les coûts de production et de consommation des énergies fossiles. Ce faisant, un prix du carbone suffisamment élevé casse la dynamique de la rente énergétique, le mécanisme économique sous-tendant l'incroyable capacité de résistance des fossiles dans le système économique actuel ([chapitre 7](#)). Il introduit une nouvelle valeur dans l'économie, celle qu'on accorde effectivement à la protection du climat. Cette valeur est une rente qui rémunère non plus les détenteurs de ressources fossiles, mais les

producteurs qui parviennent à introduire de nouvelles sources d'énergie pas (ou peu) carbonées et les utilisateurs qui réduisent leurs consommations d'énergie fossile. À mesure que le prix du carbone augmente, la rente carbone chasse la rente fossile. C'est donc un excellent moyen de faire rapidement apparaître l'étendue des actifs échoués à abandonner ou à reconvertir du fait de la transition énergétique. Un avantage complémentaire de la tarification carbone est d'introduire une règle empirique simple (mais probablement très imparfaite) d'attribution de la responsabilité. L'assiette d'une taxe carbone prélève la valeur carbone au moment de l'émission du CO<sub>2</sub>. Chaque émetteur, petit ou gros, est donc tenu pour responsable au prorata de ses rejets. Ceci doit jouer à l'intérieur des pays, mais également entre pays.

Le monde réel reste bien éloigné de ce schéma vertueux. Les progrès de la tarification carbone, documentés par la Banque mondiale<sup>9</sup>, sont inégaux. Le champ couvert s'est élargi, notamment du fait de la Chine qui a posé en 2019 les jalons d'un système national de quotas de CO<sub>2</sub>. Mais les niveaux de prix pratiqués restent bien trop faibles pour réorienter les décisions, à quelques exceptions européennes près sur lesquelles nous reviendrons au [chapitre 12](#). C'est ce qui explique la modicité des recettes générées par cette tarification. En 2018, les gouvernements ont perçu dans le monde une rente carbone de 44 milliards de dollars sous forme de taxe ou de mise aux enchères de quotas. La même année, les subventions aux énergies fossiles ont atteint, d'après l'AIE, un montant pratiquement dix fois supérieur (427 milliards). Ces subventions sont autant de « prix du carbone négatifs » qui retardent la transition énergétique. Sous l'angle de la tarification carbone, l'élimination des prix du carbone négatifs est aussi stratégique que la

montée en régime du prix du CO<sub>2</sub>. Ce serait un grand progrès d'en discuter les conditions dans le cadre de la négociation climatique.

## **UN DOUBLE POTENTIEL INCITATIF ET DISTRIBUTIF**

Comment sortir de cette course de lenteur en matière de tarification carbone ? Dans la logique Kyoto, l'idée était de constituer « par le haut » une tarification commune du carbone s'appliquant aux pays riches puis s'élargissant graduellement au reste du monde. Avec l'accord de Paris, le principe est d'inciter les parties volontaires à coopérer pour le déploiement d'instruments économiques (article 6). À la COP24 de Katowice, la question de la tarification carbone a été abordée. Les parties ne sont pas parvenues à s'accorder sur des règles communes de comptabilisation entre pays lors de débats assez surréalistes, témoignant de la rémanence du « schisme de réalité » : la question centrale des impacts distributifs d'une telle tarification n'a pas été effleurée.

Sur le plan international comme sur le plan domestique, l'introduction de la tarification carbone a privilégié le volet incitatif au détriment du volet distributif. Du coup, la montée du prix du CO<sub>2</sub> se heurte à des effets distributifs mal anticipés qui font le jeu des passagers clandestins. Pourtant, la tarification du carbone génère des ressources additionnelles qui peuvent être redistribuées. Cela joue aussi bien à l'intérieur de chaque pays que dans la recherche de coordination entre pays. Examinons ce deuxième volet qui nous semble être sous-estimé par les meilleurs auteurs.

La logique ascendante de Paris repose sur la coordination des avancées effectuées en termes de tarification carbone au sein des différents pays. Elle permet plus de flexibilité, mais pose de nouvelles questions. Les prix du CO<sub>2</sub> qui émergent des différentes

expériences sont très hétérogènes. Entre l'Ukraine et la Suède, ils varient de 1 à plus de 100 ! Faut-il dès lors viser un prix unique, conforme à la théorie économique standard, ou entrer dans la logique de prix différenciés ? L'économiste Martin Weitzman répond que l'objectif de la négociation doit porter sur des prix plancher, obtenus par des taxes internes. Chaque pays reste donc libre d'aller au-delà des minima s'il souhaite aller plus vite. Il y aura donc bien diversité des prix effectifs du CO<sub>2</sub>. Weitzman n'envisage pas de redistribuer une partie des taxes nationales entre pays<sup>10</sup>.

La proposition de William Nordhaus sur la constitution de clubs s'inscrit dans la même veine<sup>11</sup>. Nordhaus préconise de mettre graduellement en place une tarification carbone entre pays au sein d'un club qui se protège contre ceux refusant d'entrer dans la coalition par une protection aux frontières. À un mécanisme de taxation du carbone, complexe à mettre en œuvre, il préfère l'instauration d'un droit de douane s'appliquant à tous les produits. Le Prix Nobel ne craint pas de recommander une forme de protectionnisme vert pour décourager le passager clandestin. Il rejoint ainsi les militants dont les banderoles affichent l'incompatibilité entre l'ouverture indiscriminée des frontières commerciales et la marche vers la neutralité carbone. De telles représailles commerciales auraient tout leur sens si par exemple la Chine et l'Union européenne, les deux principales entités pratiquant la tarification carbone, constituaient un club sans parvenir à y attirer les États-Unis. Mais faudrait-il adopter la même attitude vis-à-vis de l'Afrique au sud du Sahara ? Cela n'aurait aucun sens. La stratégie gagnante serait plutôt de leur proposer d'entrer dans la coalition en leur redistribuant une partie des ressources collectées par la tarification carbone et les droits de douane associés au titre de la justice climatique.

Le FMI s'est emparé de la problématique de la tarification carbone au lendemain de la conférence de Paris. Dans une étude de synthèse<sup>12</sup>, les auteurs cherchent à tirer les leçons des expériences réalisées dans le monde. Pour renforcer l'accord de Paris, leur principale préconisation est de viser un arrangement international entre pays s'engageant sur des prix plancher du carbone. Il pourrait y avoir deux prix plancher du fait des écarts importants de coûts de réduction entre pays. La parenté avec les propositions de Weitzman et Nordhaus est patente. Un apport important de l'étude est de quantifier les cobénéfices environnementaux d'une tarification carbone. Ils sont particulièrement élevés chez les gros émetteurs asiatiques du fait du coût croissant des pollutions urbaines générées par le charbon et les carburants. C'est une sérieuse carotte pour attirer ces pays dans le club. Le FMI insiste aussi sur le potentiel redistributif de la taxation carbone à l'intérieur de chaque pays. Bien que ce soit l'un de ses domaines de compétence, il n'explore pas les transferts financiers entre pays qui pourraient être organisés au nom de la justice climatique.

Le potentiel redistributif d'une taxe carbone est également mis en exergue par la démarche Carbon Dividend soutenue aux États-Unis par vingt-six Prix Nobel d'économie<sup>13</sup>. La proposition consiste à instaurer une taxe carbone dont le produit serait intégralement redistribué aux ménages sous forme d'un chèque mensuel identique pour tous. Si elle franchit les obstacles du Congrès, la proposition pourrait bouleverser la donne aux États-Unis. Mais pourquoi l'appliquer aux seuls résidents américains en les protégeant du reste du monde avec une protection commerciale ? Ne vaudrait-il pas mieux chercher à y inclure les résidents indiens ou d'Afrique subsaharienne ?

C'est en rattachant le volet incitatif et le volet distributif de la tarification carbone qu'apparaît son potentiel. C'est vrai à l'intérieur de chaque pays, mais également pour asseoir la crédibilité de l'accord climatique.

Sous l'angle incitatif, un prix du CO<sub>2</sub> inférieur à 10 dollars peut intéresser les ministres des Finances, car il introduit une recette fiscale pérenne, mais c'est nettement insuffisant pour changer les décisions économiques. Entre 10 et 30 dollars, le prix du CO<sub>2</sub> commence à mordre sérieusement sur la rentabilité du charbon qui est concurrencé dans toutes ses applications thermiques. Entre 30 et 50 dollars, le pétrole devient de moins en moins rentable, en commençant par celui issu des gisements les moins favorables. Entre 50 et 100 dollars, il est de moins en moins avantageux d'extraire ou d'utiliser la plupart des énergies fossiles, y compris le gaz naturel. Au-delà de 100 dollars, on ne peut plus faire tourner l'économie qu'avec des méthodes non émettrices. Seuls l'inertie des stocks de capital et les comportements hérités du monde carboné maintiennent de vieux outils de production utilisant les énergies fossiles. Quand on se pose la question du « bon » prix du carbone, c'est à partir de cette échelle, ici très schématisée, qu'il convient de se positionner sous l'angle des incitations économiques.

Sous l'angle distributif, les masses financières levées sont, au démarrage, bien plus consistantes pour un prix du CO<sub>2</sub> de 100 dollars (3 700 milliards, soit 4,3 % du PIB mondial) que de 10 dollars (0,4 % du PIB mondial). Mais plus le prix est élevé, moins la recette sera pérenne, car l'élévation du prix du CO<sub>2</sub> engendre des baisses d'émission qui contractent l'assiette du prélèvement. L'implication pour l'accord climatique saute aux yeux. Il convient, au démarrage, d'introduire un prix suffisamment élevé pour échapper au *Green Paradox* ([chapitre 6](#)) et diriger une partie significative de la

somme prélevée vers les pays les plus vulnérables. Ces pays ont besoin de mobiliser du capital pour accroître leur résilience face au réchauffement et généraliser l'accès à l'énergie.

La référence de 100 milliards citée dans l'accord de Paris ne résulte pas d'un chiffrage de ces besoins. C'est un chiffre rond, devenu fétiche car il laisse penser à une grosse somme. C'est loin d'être le cas. Les négociateurs ont même peut-être oublié un zéro. Le rapport 1,5 °C du GIEC nous rappelle que le réchauffement frappe les plus vulnérables bien avant que les 2 °C soient atteints. On peut en tirer des conclusions incantatoires sur le rehaussement de la cible à long terme. Cette discussion participe du « schisme de réalité ». La réelle implication est qu'il va falloir s'occuper beaucoup plus sérieusement et rapidement des stratégies d'adaptation aux impacts du changement climatique.

## **100 MILLIARDS POUR LE CLIMAT : SERVICE MINIMUM !**

Malgré les déclarations lénifiantes, la réalité est que lever 100 milliards de dollars au titre de la justice climatique apparaît comme mission impossible. Du moins dans le cadre des relations internationales existantes. La question rappelle le serpent de mer qu'a été la promesse des pays développés de consacrer 0,7 % du PIB à l'aide au développement.

En 1958, le Conseil œcuménique des Églises lance un appel. Il demande aux pays industrialisés de consacrer 1 % de leur richesse au développement des pays pauvres. En 1968, la majorité des pays donateurs s'accordent sur un objectif de 0,7 % à la conférence de la CNUCED de New Delhi<sup>14</sup>. Ce chiffre est proche du 0,75 % recommandé par l'économiste Jean Tinbergen, le premier à avoir reçu le Nobel avec son homologue norvégien Ragnar Frisch. Cet



engagement, depuis sans cesse réitéré, n'a jamais été atteint. En 2018, le montant de ces transferts est estimé par l'OCDE à 0,31 %. Moins de la moitié de l'objectif ! La prise en compte de la justice climatique implique de changer d'échelle et de méthode.

En 2019, le monde s'est métamorphosé. Il n'est plus binaire, mais multipolaire. Les lignes de partage des années 1960 entre pays riches et pays pauvres se sont déplacées. Surtout, le changement climatique, par ses impacts différenciés, a commencé à creuser de nouvelles inégalités entre pays, comme le montrent Noah Diffenbaugh et Marshall Burke de l'université de Stanford<sup>15</sup>. Sans une action volontariste contrariant le mouvement, ces inégalités vont s'amplifier durant les décennies qui viennent. Et ceci, même dans les scénarios les plus optimistes de réduction des émissions. Ce qu'on attend d'un accord climatique juste, c'est qu'il enrayer cette aggravation des inégalités au détriment des pays les plus vulnérables.

Appliquer le principe pollueur-payeur en introduisant une tarification carbone internationale répond au critère de justice réparatrice. Cela crée une rente d'un montant élevé sitôt que le prix du CO<sub>2</sub> est significatif, répartie entre pays au prorata de leurs émissions. Une partie de cette rente devrait être redistribuée pour répondre aux critères de justice distributive : renforcer la résilience des plus vulnérables et élargir leur accès à l'énergie.

Les stratégies d'adaptation visent à accroître la résilience face au réchauffement. Par construction, elles ne peuvent être menées que localement, en fonction des conditions économiques et climatiques locales. L'accord de Paris appelle bien à utiliser une partie des 100 milliards au titre de l'adaptation des pays pauvres, sans donner plus de détail. Or, 100 milliards de dollars par an semblent bien modestes si on veut aider les pays les plus vulnérables face au

réchauffement. Rappelons juste les impacts sur les systèmes agricoles et les zones littorales ou insulaires les plus exposées.

Face aux îlots de chaleur urbains, l'une des parades est de végétaliser les villes. Sur certaines surfaces, les toits par exemple, cette végétalisation peut donner lieu à des productions alimentaires. On développe alors l'« agriculture urbaine », en remettant du vivant dans la ville. Un investissement, certes novateur, qui ne doit pas être l'arbre cachant la forêt. Le problème majeur posé par le réchauffement sera celui de la capacité des systèmes agricoles à maintenir dans de bonnes conditions l'approvisionnement alimentaire des populations. C'est d'abord un problème d'équilibre entre territoires urbains et territoires ruraux. Dans la majorité des zones tropicales, il se pose de façon exacerbée : le réchauffement menace durement l'équilibre des systèmes agricoles existants. Les méthodes pour y faire face ne peuvent reposer ni sur les pratiques traditionnelles ni sur l'introduction des méthodes culturales appauvrissant la diversité du vivant. Accroître la résilience des systèmes agricoles et alimentaires implique d'introduire à grande échelle de nouvelles méthodes agroécologiques, similaires aux projets pilotes présentés au [chapitre 9](#). Cela demande beaucoup de capital humain et d'investissements matériels.

Dans beaucoup de cas, par exemple la restauration des mangroves, le réinvestissement dans la diversité du milieu naturel est la meilleure défense contre la montée des eaux. Mais cela n'est pas à la hauteur des pressions auxquelles feront face les zones littorales et insulaires les plus exposées ([chapitre 3](#)). À l'image de la démarche des Pays-Bas, probablement le seul pays riche ayant une vulnérabilité comparable, ces pays doivent mettre en place des plans comprenant des investissements physiques (digues et autres ouvrages), mais aussi beaucoup de capital humain pour anticiper les

impacts détaillés et planifier les réponses à la maille géographique la plus fine. Ici encore des besoins considérables d'investissement.

Des besoins accrus en capital qu'on retrouve pour élargir l'accès à l'énergie. Jusqu'à présent, cet accès a été réalisé dans le monde grâce à l'extension d'infrastructure contribuant à accroître l'usage des énergies fossiles. Dans les pays moins avancés, ces infrastructures ne desservent qu'une fraction minoritaire de la population. La transition bas carbone consiste donc à construire directement un réseau d'infrastructures reposant sur de nouvelles sources non carbonées. Des signes encourageants montrent le potentiel du solaire décentralisé allié à la téléphonie en Afrique au sud du Sahara ([chapitre 6](#)). Accélérer cette transition requiert à nouveau beaucoup plus de moyens.

L'expression des besoins n'apporte pas en elle-même les moyens de les satisfaire. Pourquoi la contrainte climatique permettrait-elle de mobiliser des ressources que plus d'un demi-siècle de promesses n'a pas concrétisé en matière d'aide au développement ? Le monde n'a guère de chance de devenir brusquement altruiste à cause du réchauffement. Par contre, les pays entrant dans une démarche concertée de tarification carbone auraient deux motifs de changer d'échelle en matière de transfert vers les pays les plus vulnérables : la peur et l'intérêt partagé.

Le risque climatique étant global, il touche tous les pays. Ne pas aider les pays les moins avancés à accélérer leur développement vers le bas carbone, c'est s'exposer soi-même (ou ses descendants) à des risques accrus : ces pays risquent de prolonger, demain, la logique de l'empilement ([chapitre 1](#)), en prenant le relais de la croissance des émissions. Ils contribueront à aggraver le risque climatique qui touche aussi les donateurs. Voici pour l'argument de la peur. Il peut se décliner à loisir dans le débat politique, notamment

en termes de réfugiés climatiques potentiels se présentant aux frontières en raison de l'aggravation du réchauffement.

L'argument de l'intérêt est plus positif, donc plus fort, que celui de la peur. Dans la vision classique de l'aide au développement, les pays riches exportent des méthodes qu'ils maîtrisent. Ils sont les sachants qui vont transférer leur savoir en plus de leurs capitaux. On n'est plus du tout dans ce cas de figure avec le réchauffement climatique. Constituer une infrastructure énergétique bas carbone est une entreprise inédite. On ne parvient pas plus à la mener dans les pays riches que dans les pays pauvres. C'est peut-être même l'inverse du fait de l'addiction séculaire des premiers aux énergies fossiles. Transférer des ressources pour élargir l'accès à l'énergie dans un environnement bas carbone est une forme d'apprentissage, qui doit se mener dans des formes de coconstruction bien plus que d'exportation de savoir-faire. Cela ouvre aussi des marchés en permettant d'abaisser les coûts des équipements nouveaux, comme l'ont bien compris les Chinois. Il en va de même pour tout ce qui concerne l'adaptation au changement climatique et en particulier son volet primordial de réinvestissement dans l'agroécologie. Contribuer au renforcement de la résilience des systèmes agricoles tropicaux est probablement le meilleur moyen de remettre en question et de transformer nos propres modes de développement agricole. Ceux qui ont permis d'élargir les approvisionnements alimentaires au prix d'un appauvrissement du capital de diversité naturelle.

Cette dynamique de l'apprentissage explique pourquoi les formes décentralisées de coopération, notamment à l'échelle des villes ou des territoires, semblent souvent aller plus rapidement que celle entre les États. Mais ce sont les États, seuls représentés autour de la table de négociation climatique, qui maîtrisent le plus gros paquet des ressources financières.

## **PRIX INDICATIF DU CO<sub>2</sub> ET RÉORIENTATION DES INVESTISSEMENTS**

En l'absence de tarification carbone dans l'économie réelle, un prix indicatif du CO<sub>2</sub> peut être utilisé comme une boussole pour éclairer les implications des choix économiques. Un prix indicatif n'est pas réglé par les émetteurs de CO<sub>2</sub>. C'est un outil de mesure de l'externalité climatique, qu'on se contente d'intégrer dans le calcul économique. Il peut influencer certaines décisions économiques, mais son impact sur le fonctionnement de l'économie est bien moindre que celui d'un prix effectif. C'est une simple boussole guidant l'homme à la barre, alors que le prix effectif du CO<sub>2</sub> fournit aussi le carburant du navire grâce à sa double propriété incitative et distributive.

La transition énergétique se heurte à l'inadéquation du stock de capital matériel et humain servant de soubassement à l'économie des fossiles. D'où un besoin patent d'investissement pour créer de nouvelles infrastructures, notamment en matière d'énergie et de transport. La prise de conscience de ce besoin est à l'origine d'un mouvement que l'on peut qualifier de « néo-keynésien », présent des deux côtés de l'Atlantique, en faveur d'un Green New Deal. La démarche de Jean Jouzel et Pierre Larrouturnou s'inscrit dans cette mouvance<sup>16</sup>. Elle préconise la création d'une banque publique du climat qui bénéficierait de possibilités quasi illimitées de refinancement monétaire. Cette vision a le mérite de mettre le doigt sur la nécessité d'accroître l'effort d'investissement public pour constituer des infrastructures bas carbone. C'est une nécessité absolue. Il serait cependant trompeur de réduire le problème à une question d'« insuffisance d'investissement ». D'un côté, il faut désinvestir ou reconvertir des infrastructures liées à l'économie des fossiles ; de l'autre, il faut en construire de nouvelles pour mobiliser

et utiliser les nouvelles sources décarbonées. La transition énergétique implique une réorientation rapide des investissements. L'utilisation d'un prix indicatif du CO<sub>2</sub> permet de s'engager dans ce double schéma de désinvestissement-investissement sans trop gaspiller de capital. Ce prix peut être utilisé par les entreprises, les gouvernements et dans le secteur financier.

Un nombre croissant d'entreprises, généralement de grande taille, utilisent un tel prix indicatif pour éclairer les choix d'investissement. Cette pratique a été analysée par Raphaël Olivier, doctorant à la Chaire Économie du Climat<sup>17</sup>. Le prix du CO<sub>2</sub> devient alors un outil de pilotage, facilitant leurs transformations internes. Il a deux vertus principales : homogénéiser les décisions qui se prennent dans des contextes géographiques très hétérogènes ; se préparer au durcissement des régulations climatiques qu'anticipent un nombre croissant d'opérateurs économiques. Dans le cadre des démarches volontaires promues par l'accord de Paris, le Carbon Disclosure Project tente de fédérer et d'harmoniser ce type de démarche.

Un usage important du prix indicatif du CO<sub>2</sub> consiste à éclairer les choix d'investissement public. En France, cela se pratique via ce qu'on appelle la « valeur tutélaire » du carbone. Aux États-Unis, les agences fédérales doivent appliquer un tel prix indicatif appelé « *social cost of carbon* ». Le niveau où on fixe ce prix indicatif est très important. Par exemple, à la suite de l'arrivée de l'administration Trump au pouvoir, le prix indicatif du CO<sub>2</sub> a été drastiquement réduit par un artifice de calcul. Cela permet à l'agence environnementale de détricoter ce qu'avait tenté de mettre en place l'administration Obama pour réduire les émissions de CO<sub>2</sub> du secteur électrique. À l'inverse, la valeur tutélaire du carbone a été récemment révisée à la hausse en France, ce qui reflète une préoccupation croissante face

au climat. La boussole du prix indicatif du CO<sub>2</sub> constitue un outil irremplaçable permettant de guider les investissements publics dans le domaine des infrastructures. Elle devrait également être systématiquement utilisée dans les politiques publiques pour privilégier les mesures qui réduisent les émissions au plus faible coût.

À l'interface des gouvernements et du système financier se trouvent les agences publiques d'aide au développement. Pour ces agences, la prise en compte d'un prix indicatif du CO<sub>2</sub> significatif entraîne une reconfiguration des portefeuilles de projets énergétiques vers le bas carbone. Cela participe à la réorientation des flux financiers préconisée par l'accord de Paris, mais ne génère aucune ressource supplémentaire. Si les projets bas carbone sont plus longs à se réaliser ou plus coûteux par unité énergétique produite, cela peut même nuire à l'objectif d'accès à l'énergie dans les pays pauvres. Par ailleurs, un prix indicatif du CO<sub>2</sub> ne permet guère de réorienter les projets agricoles et forestiers.

## **LES BANQUES CENTRALES AU SECOURS DU CLIMAT ?**

La galaxie financière est un domaine où l'utilisation d'un prix indicatif du CO<sub>2</sub> semble prometteuse. Elle peut résulter en premier lieu de démarches volontaires d'établissements financiers ou d'investisseurs. L'application d'un prix indicatif du CO<sub>2</sub> permet par exemple de mesurer l'impact carbone d'un portefeuille de prêts ou d'actifs financiers. Une information importante et pas toujours facile à mesurer. Lorsque les établissements font cette démarche, ils l'utilisent généralement pour labelliser une partie de leur activité dans un vaste compartiment dit « vert ». La somme de ces compartiments constitue ce qu'on appelle la « finance verte » ou la

« finance climat ». C'est probablement utile pour le département marketing des établissements, car une fraction croissante des clients est sensible à l'argument environnemental.

Quel est le retour de cette finance verte sur l'économie réelle ? Malgré les intentions affichées, la finance responsable n'a pas tari, ni même infléchi, les investissements sur le charbon et les fossiles dans le monde ([chapitre 7](#)). Quand l'Allemagne décide de fermer ses centrales thermiques, c'est l'État qui prend les engagements financiers. Pas la Deutsche Bank qui n'en aurait du reste probablement plus les moyens. Sous l'angle financier, les études rigoureuses montrent que les couples rendements/risques de ces produits verts ne se différencient que marginalement du reste du marché<sup>18</sup>. Ils ne permettent pas à l'emprunteur ou à l'émetteur d'obtenir de meilleures conditions de financement. Il est donc probable que la finance verte autodéclarée n'élargisse pas les financements disponibles pour agir face au réchauffement climatique.

Il pourrait en aller autrement si le prix indicatif du CO<sub>2</sub> était intégré à la régulation financière. À la suite de la crise de 2008, les banques centrales ont pris beaucoup de liberté avec les règles macroprudentielles classiques. C'est par le biais du risque que le climat pourrait s'immiscer dans le monde des banquiers centraux et autres régulateurs financiers. Quelques mois avant la COP de Paris, Mark Carney, le gouverneur de la Banque d'Angleterre, a identifié trois leviers par lesquels le climat pouvait menacer la stabilité financière : les risques physiques, liés aux impacts, les risques en responsabilité, résultant de la multiplication des recours, et les risques de transition avec la dévalorisation rapide des actifs échoués. Appliquer un prix du CO<sub>2</sub> est la bonne façon de prévenir les risques de responsabilité et d'anticiper les pertes de valeur des



actifs échoués<sup>19</sup>. Pour passer à l'acte, les banquiers centraux pourraient commencer par s'appliquer à eux-mêmes cette règle lorsqu'ils achètent des titres financiers sur le marché. Un second canal de transmission serait d'intégrer ces prix dans les règles prudentielles qui encadrent les comportements des établissements financiers et des compagnies d'assurance.

L'impact potentiel de l'introduction d'un prix du CO<sub>2</sub> dans la régulation financière est difficile à anticiper. Pour certains économistes comme Michel Aglietta ou Laurence Scialom, la prise en compte du risque climatique dans la régulation financière pourrait constituer un levier majeur de la transition bas carbone tout en réduisant les risques d'instabilité. C'est poser une hypothèse forte sur la capacité de la sphère financière à réorienter les flux d'investissement réels pour rééquilibrer le stock de capital matériel et humain au profit des actifs bas carbone<sup>20</sup>. C'est peut-être accorder un pouvoir qu'il n'a pas à l'« ogre financier », suivant l'expression de Scialom<sup>21</sup>. La meilleure façon de le vérifier ou de l'infirmier est que les banquiers centraux impulsent rapidement ce virage dans la régulation financière.

## **LA GOUVERNANCE CLIMATIQUE MULTILATÉRALE**

À la suite de l'alerte des scientifiques, le climat a pénétré la vie collective via le système des Nations unies. Une voie toute tracée, vu le caractère planétaire des enjeux. Le GIEC a été placé, dès sa création, sous l'égide de deux agences multilatérales (l'Organisation météorologique mondiale et le Programme des Nations unies pour l'environnement). À partir de 1992, la Convention-cadre des Nations unies, avec son secrétariat et ses différents organismes techniques basés à Bonn, joue un rôle pivot dans la gouvernance climatique.

Cette gouvernance présente une spécificité unique en son genre : c'est l'un des rares forums internationaux où la voix d'une petite île du Pacifique ou d'un pays enclavé au sud du Sahara compte autant que celle des États-Unis ou de la Chine. Cette spécificité doit être maintenue. C'est une dimension importante de justice climatique. Le risque, analysé en détail par Aykut et Dahan, est que le système de la Convention tombe dans un entre-soi, en se coupant d'autres organisations onusiennes plus puissantes régulant les affaires économiques, financières, commerciales.

L'exemple du commerce est révélateur. La liberté du commerce est un pilier de la mondialisation. Cette liberté repose sur des règles destinées à assurer la justice commutative. Elles sont édictées au sein de l'Organisation mondiale du commerce (OMC), également chargée de les faire respecter dans un système complexe de règlement des différends. Dans son organisation actuelle, l'OMC ne comporte guère de garde-fous permettant de subordonner les principes de liberté du commerce aux exigences de la protection du climat. Le rapport du groupe de travail présidé par l'économiste Katheline Schubert, qui a examiné à la demande du gouvernement français le traité conclu entre l'Union européenne et le Canada (CETA), l'indique de façon abrupte : « les bénéfices à attendre des accords de libre-échange ont par le passé été surestimés par leurs promoteurs, tandis que les conséquences distributives en ont été minimisées et les externalités négatives tout simplement ignorées<sup>22</sup>. » Dans le cas du CETA, le risque principal est que le traité prolonge l'exploitation des hydrocarbures canadiens en ouvrant de nouveaux débouchés aux pétroles de schiste. L'accord commercial conclu en juin 2019 entre l'Union européenne et le Mercosur porte lui le risque supplémentaire d'élargir les débouchés du soja et de la viande bovine, tous deux produits au détriment de la

forêt amazonienne. Pour que le commerce ne soit plus « climaticide », il conviendrait que l'OMC s'empare de la question en incluant dans ses normes internationales des clauses de sauvegarde pour aligner les flux commerciaux sur les exigences de l'accord de Paris.

Plus généralement, le renforcement de la gouvernance climatique multilatérale devrait passer par une coordination renforcée entre les différentes organisations multilatérales, chacune prenant en charge les volets propres à son domaine de compétence. Ce schéma, encore peu imaginable il y a quelques années, pourrait prendre corps assez rapidement. L'une des retombées positives de l'accord de Paris est que la quasi-totalité des agences multilatérales se sont emparées de la question climatique. Y compris des organisations sectorielles, comme celles régentant le trafic aérien ou maritime, qui ont longtemps joué les passagers clandestins dans le système des Nations unies. Cette évolution est à l'image de celle des sociétés où le climat a cessé d'être une question débattue entre experts. Elle est très rapide au sein des sociétés européennes : hier à la périphérie du débat public, le climat s'affiche désormais au cœur des questions de société.

## CHAPITRE 12

# VERS UNE FRANCE ZEN<sup>1</sup>

Du discours sur la « Maison qui brûle » de Jacques Chirac en 2002 au « *Make our Planet great again* » d'Emmanuel Macron en réponse au retrait américain de l'accord de Paris, les formules-choc n'ont pas manqué. Sans oublier le plaidoyer de Nicolas Sarkozy en faveur de la « contribution climat-énergie » en clôture du Grenelle de l'environnement en 2007, ni l'implication de François Hollande dans la préparation de la conférence de Paris de 2015. Au sommet de l'État, la détermination semble inébranlable quand il s'agit du réchauffement de la Planète.

Sitôt qu'on descend d'un échelon, l'affaire se complique. Depuis le Grenelle de l'environnement, la fonction de ministre de l'Environnement a été réévaluée dans la hiérarchie gouvernementale. Mais le poste est devenu un siège éjectable. L'espérance de vie du titulaire du maroquin est la plus faible de toutes celles des membres du gouvernement.

Rejoignons le pays réel. Celui des lotissements et des quartiers, des ronds-points et des collèges. Quand il faut mettre la main au porte-monnaie, les choses se gâtent. Sortis de nulle part, les gilets jaunes s'opposent avec succès à la hausse d'une taxe carbone « injuste ». Au même moment, plus de 2 millions de nos concitoyens

soutiennent un recours visant l'État français au nom de la justice climatique. La jeunesse y semble particulièrement sensible, jusqu'à ces collégiens qui reprennent le mot d'ordre de grève de Greta Thunberg, la jeune icône suédoise de la cause climatique.

La menace climatique devrait unir le pays. Elle semble cristalliser les incompréhensions et polariser les oppositions. En entendant nos présidents, on pourrait croire que le climat est devenu un point d'ancrage majeur de l'action publique. Le Haut conseil pour le climat, une nouvelle instance consultative créée à la hâte par Emmanuel Macron en pleine crise des gilets jaunes, avance un diagnostic bien différent : le climat reste à la « périphérie des politiques publiques » et a « peu de poids lors des arbitrages<sup>2</sup> ». Le pays réel, lui, est en train de prendre conscience du risque climatique et de ses implications sur ses modes de vie. D'où l'exacerbation des tensions.

**Figure 12.1 La fronde des gilets jaunes**



*Blocage d'un rond-point par les gilets jaunes aux abords de la zone industrielle de Foss sur Mer. Face à l'ampleur de la fronde, le gouvernement français a été contraint de stopper la hausse des taxes sur les énergies fossiles.*

Source : <https://www.latribune.fr/opinions/tribunes/gilets-jaunes-et-taxe-carbone-les-centimes-de-la-discorde-798180.html>

Dans ce dernier chapitre, nous tentons de réfléchir aux ingrédients de ce que pourrait être une politique climatique mobilisatrice pour la France. Une telle politique vise deux objectifs : l'accroissement de la résilience de notre société face aux impacts du réchauffement (adaptation) ; la gestion des transformations requises pour atteindre la neutralité carbone (atténuation) : la « France ZEN » pour reprendre la formule d'une étude d'Entreprises pour l'Environnement (EPE)<sup>3</sup>.

Nous commençons cet examen à l'échelle des territoires qui a été fortement sous-estimée par une politique climatique bien trop parisienne ; nous le poursuivons au niveau national en nous

interrogeant sur la cohérence de la panoplie des moyens d'action engagés par l'État ; nous l'achevons en remontant à l'échelle européenne où le climat s'est imposé comme un thème majeur des élections de mai 2019 avec des intentions affichées qu'il faut maintenant traduire en actions effectives.

## **LE PAYS FACE AU RISQUE CLIMATIQUE**

Ouvrons notre manuel de géographie : située aux latitudes moyennes, à la pointe ouest du continent européen, la France bénéficie d'un « climat tempéré ». Cela n'a pas empêché le mercure de monter jusqu'à 46 °C le 28 juin 2019 à Vérargues, dans l'Hérault. Un chiffre jamais atteint depuis que Météo France effectue des relevés. Il est vrai que les manuels vantent aussi la diversité climatique de l'Hexagone, situé à la jonction des influences méditerranéennes et septentrionales. Un cas unique en Europe.

46 °C à l'ombre, c'est beaucoup pour un climat tempéré ! Le réchauffement à l'œuvre modifie les variables climatiques que nous considérons hier comme stables dans le temps. L'étude prospective sur le climat qu'il fera demain en France<sup>4</sup> nous rappelle que le durcissement des conditions climatiques va se poursuivre dans les prochaines décennies ([chapitre 3](#)). Les scénarios les plus héroïques de baisse des émissions dans le monde ne freinent significativement le réchauffement global qu'après 2050. L'étude nous apprend également que le durcissement des événements extrêmes – les canicules, mais aussi les précipitations, les tempêtes... – vont nous éloigner des caractéristiques d'un climat tempéré. Elle montre enfin la grande hétérogénéité des territoires face au réchauffement et les multiples incertitudes sur la cartographie détaillée des climats de demain.

Comment devons-nous réagir aux impacts du réchauffement et nous préparer à ceux qui ne manqueront pas de nous affecter demain ? C'est la question de l'adaptation au changement climatique.

Le lecteur non initié sera surpris d'apprendre l'existence d'une stratégie nationale d'adaptation au changement climatique, ainsi définie sur le site du ministère de l'Écologie : « La stratégie nationale d'adaptation au changement climatique exprime le point de vue de l'État sur la manière d'aborder la question de l'adaptation au changement climatique. Cette stratégie a été élaborée dans le cadre d'une large concertation, menée par l'Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique (ONERC)<sup>5</sup>. » En guise de politique, l'expression d'un point de vue par l'État sur la manière d'aborder une question : comprenez qui pourra ! La vérité est que l'ONERC a fait un travail remarquable de recherche et de sensibilisation, mais que l'État n'a guère investi dans une politique d'adaptation qui touche le citoyen. Il ne faut donc pas s'étonner si ce même citoyen se retourne contre l'État en refusant de régler la taxe carbone ou en le poursuivant devant les tribunaux. Pour construire une telle politique, il faut être clair sur le partage des responsabilités des uns et des autres.

Suivant une conception libertarienne de la société, la meilleure façon de s'adapter serait de laisser à chacun le soin d'anticiper les impacts qui vont le concerner pour agir en conséquence. Dans une telle optique, l'intervention publique est indésirable. On peut dès lors supprimer l'ONERC ou le transformer en un simple intermédiaire entre les citoyens et les compagnies d'assurance qui aideront leurs clients à identifier les risques en faisant varier les primes sur le marché. Libre à chacun de mutualiser le risque ou pas. Cette vision n'a guère de partisans en France, pas même dans l'industrie de



l'assurance bien consciente que le risque climatique n'est pas à ranger dans la catégorie des risques assurables.

À l'autre extrême, on peut considérer que c'est à l'État d'assurer la protection des citoyens contre le risque climatique et s'en remettre à sa clairvoyance. Une telle vision s'inscrit mieux dans une tradition hexagonale où le citoyen demande beaucoup à l'État en matière de protection. Dans ce cas, il faut créer un super ONERC qui évalue, pour chaque commune, bassin versant, zone littorale, la distribution des risques pour mettre ensuite les moyens de prévention proportionnés. Le surréalisme de cette option qui déresponsabiliserait le citoyen et l'élu local saute aux yeux.

Comme l'indiquent les travaux de l'ONERC, la bonne méthode consiste à rechercher une synergie entre l'État et les acteurs territoriaux pour ce qui relève de l'action publique et les citoyens, et les acteurs économiques pour ce qui est du domaine privé. Souvenons-nous de l'exemple de la Nouvelle-Aquitaine ([chapitre 3](#)). L'échelle des vulnérabilités face au réchauffement ne peut s'évaluer qu'à la maille territoriale très fine. Une fois l'évaluation faite, une grande partie des actions à conduire sont également du ressort des acteurs territoriaux. Ces acteurs se regroupent en deux ensembles : les régions qui ont la charge de la planification d'aires territoriales assez larges ; les municipalités qui assurent la supervision des services publics locaux directement liés au risque climatique (eau, énergie, déchets, transports publics...) et mettent en œuvre les règles d'urbanisme et de planification spatiale fine des activités humaines.

L'action pour accroître notre résilience face au risque climatique implique par conséquent la mobilisation de trois échelons territoriaux : État, régions, municipalités. L'efficacité exige une bonne division des tâches afin d'éviter les doublons. Les prérogatives

d'intérêt général doivent être clairement définies. Il ne s'agit en aucune façon de se substituer aux citoyens ou aux acteurs économiques privés, mais d'assurer trois missions principales se rattachant à la justice climatique.

D'abord, il convient d'assurer l'information la plus rigoureuse possible sur les impacts attendus à la maille territoriale la plus fine. Face au risque climatique, les agents privés sont loin d'avoir la même information. Corriger les asymétries d'information pour que chacun puisse anticiper les impacts climatiques risquant de l'affecter est le premier volet de la politique d'adaptation. C'est aussi le meilleur antidote au climatoscepticisme comme au climatocatastrophisme. L'État a ici un rôle d'impulsion majeur, car il a la main sur les ressources scientifiques et techniques à mobiliser, via le service public de la météorologie qui doit être renforcé pour développer sa branche climatique.

Ensuite, les citoyens et les territoires ne sont pas égaux face au risque climatique. Une vague de chaleur frappe bien plus durement une passoire thermique qu'un immeuble correctement isolé : un excellent motif d'accélérer la rénovation du parc. La géographie rend certaines zones littorales ou méditerranéennes bien plus vulnérables, sans évoquer les territoires ultramarins ou les zones rurales en déshérence. L'objectif de l'intervention publique doit être d'empêcher que le réchauffement aggrave la position relative des plus vulnérables. Au nom de ce principe, il serait souhaitable d'intégrer un critère de vulnérabilité climatique dans la clé de répartition régissant les dotations financières de l'État vers les régions et les communes. Une répartition inégalitaire de ces ressources au profit des plus vulnérables semble être la réponse adaptée.

Enfin, l'action publique doit intervenir chaque fois qu'une réponse collective est préférable à la somme des actions individuelles. Face au risque de submersion, les réponses individuelles atteignent vite leur limite par exemple ; il convient donc de renforcer la planification spatiale fine en répartissant au mieux les activités humaines en fonction des impacts attendus et en incluant, si cela s'avère nécessaire, des infrastructures de protection qui ne sont que la partie visible de la démarche. Face aux vagues de chaleur, les réponses individuelles sont également insuffisantes. Pire, si elles se contentent de faire appel à plus de climatisation, elles peuvent aggraver la cause du mal. L'intervention publique doit alors concilier l'objectif d'accroître la résilience de la société face au risque climatique avec celui d'agir sur les causes du réchauffement global. Coupler adaptation et atténuation.

## **DYNAMIQUES TERRITORIALES**

Trop négligée, la faiblesse de la politique d'adaptation se retourne comme un boomerang contre le sommet de l'État quand les citoyens prennent conscience du risque climatique. Pour faire du climat un élément moins périphérique de l'action publique, il convient de renforcer ce volet adaptation en déployant une nouvelle synergie entre l'État, les régions et les municipalités. Ce faisant, on aura fait un premier pas vers une politique climatique territoriale rapprochant l'État du citoyen.

En effet, l'échelle des territoires est aussi celle où se prennent la plupart des décisions impactant notre empreinte climatique : la façon dont nous nous logeons, nous transportons, nous nourrissons. Les territoires sont autant de laboratoires expérimentaux où se testent en grandeur réelle toute la panoplie des actions visant à réduire nos

émissions. Ce sont des lieux d'apprentissage où se créent des synergies, entre secteurs et entre acteurs, invisibles dans les courbes lissées de décarbonation confectionnées, secteur par secteur, dans les bureaux du ministère. Ils sont des lieux d'innovation qui se diffusent rarement de façon linéaire, mais par succession d'à-coups, d'échecs et de réussites, impossibles à prévoir à l'avance. Parmi ces innovations, beaucoup parviennent à agir à la fois sur le front de l'adaptation et de l'atténuation du réchauffement, deux volets complémentaires de toute politique climatique.

Revenons à l'exemple des vagues de chaleur. Sitôt que le thermomètre monte au-dessus de 40 °C, les vendeurs de climatisation se frottent les mains. Et pour cause : à court terme, c'est l'un des moyens les plus simples de s'adapter à ce type d'événement extrême dont la fréquence va s'accroître. Parmi les conseils diffusés dans le bulletin de vigilance nationale en cas de canicule, Météo France recommande ainsi d'utiliser un climatiseur ou, à défaut, de « se rendre dans un endroit frais ou climatisé (grandes surfaces, cinémas...) deux à trois heures par jour<sup>6</sup> ».

À très court terme, il ne semble pas y avoir beaucoup d'alternatives. Les pouvoirs publics sont donc contraints de se rabattre sur ce type d'adaptation coûteuse et antiécologique. Pour autant, la politique d'adaptation peut-elle se contenter de veiller à ce que chaque citoyen puisse bénéficier de ce type de protection lors des prochaines vagues, soit en subventionnant l'achat des climatiseurs pour les plus modestes, soit en s'assurant qu'ils ont accès à des espaces collectifs climatisés ? Deux politiques, pas tout à fait équivalentes, mais qui contribueraient l'une et l'autre au réchauffement global.

Examinons les réponses plus structurelles. Il y a en premier lieu celles concernant la construction des bâtiments et leur agencement dans leur environnement. La diffusion de normes thermiques renforcera certainement la résilience des occupants actuels de passoires thermiques. On peut juste regretter que ce jeu de normes ait été conçu dans le seul objectif d'optimiser le chauffage et de réduire les consommations énergétiques. Il ne prend pas en compte les multiples stratégies possibles pouvant faire d'un ensemble de bâtiments un système capable d'assurer une protection contre la canicule sans dépenser d'énergie. Songeons à l'architecture traditionnelle des villes mozabites, protégeant leurs occupants contre les rigueurs du climat saharien ([chapitre 3](#)).

Parmi les réponses structurelles, la végétalisation des villes est considérée par beaucoup de gestionnaires urbains comme un levier pertinent pour lutter contre les îlots de chaleur. Le constat de départ est connu : plus on a retiré de nature d'un ensemble urbain macadamisé, plus la température monte dans la journée et moins elle reflue la nuit. Lors des vagues de chaleur, cela peut engendrer des écarts de température de plusieurs degrés entre les quartiers bétonnés des grandes agglomérations et leur périphérie. Or, sous l'angle des impacts, chaque demi-degré compte ! Pour y faire face, on pourrait certes désertifier les villes et se réfugier dans les campagnes ou en bord de mer. Une forme d'adaptation que pratiquent certains personnages de Marcel Proust en se réfugiant l'été dans le Grand Hôtel de Cabourg. Mais tout le monde n'a pas le train de vie du baron de Charlus. Une voie plus raisonnable consiste à réintroduire, autant qu'il est possible, la nature dans les villes.

Végétaliser les villes est une forme spécifique de l'investissement dans la diversité du vivant. Une voie très prometteuse permettant d'agir sur les deux fronts de la politique climatique. Sous l'angle de

l'adaptation, cela permet de lutter contre les îlots de chaleur, de freiner le ruissellement des eaux en cas de précipitations extrêmes et, potentiellement, de renforcer la résilience collective face aux risques de submersion. Sous l'angle de l'atténuation, cela réduit ou supprime les émissions résultant de la production de froid et, dans des proportions très modestes, cela permet d'absorber un peu de CO<sub>2</sub> atmosphérique via la croissance des plantes.

L'investissement dans la diversité du vivant n'a évidemment aucune raison de s'arrêter aux portes de la ville. Dans les territoires ruraux qui l'entourent, les agriculteurs pratiquent l'une des activités les plus impactées par les changements du climat. Leur activité sera de plus en plus perturbée par les vagues de chaleur : coups de chaud sur la vigne, chutes de rendement sur les parcelles de grande culture, fragilité des animaux d'élevage... Les réponses ne consistent pas à végétaliser les bâtiments de la ferme, mais à basculer les systèmes de production vers les méthodes d'agroécologie, une autre façon d'investir dans la diversité du vivant. Ces méthodes permettent d'accroître simultanément la résilience face aux coups de chaud qui s'accroîtront et de réduire les émissions nettes de l'agriculture. Leur diffusion dans les territoires ruraux ou périurbains aura un impact sur les émissions et le puits de carbone sans commune mesure avec celui de la végétalisation des villes. Elle est une condition incontournable de reconquête de la biodiversité ([chapitre 9](#)).

L'agroécologie a un coût d'investissement initial non négligeable et des coûts d'exploitation généralement supérieurs à ceux des systèmes préexistants. Elle se développe pourtant très rapidement à l'échelle des territoires sitôt que les acteurs entrent en synergie et créent des filières locales valorisant mieux les productions. Dans les plans climat territoriaux, ces démarches de planification territoriale

conduites à l'échelle municipale (généralement les intercommunalités), l'investissement dans l'agroécologie est un axe important pour réduire les cassures à l'intérieur du territoire et irriguer les zones rurales en ressources économiques additionnelles. Elle se double d'actions visant à diffuser la production d'énergie décentralisée, principalement le biogaz et le solaire, en complément de l'activité agricole. La transition agroécologique se construit alors en synergie avec la transition énergétique. Car les modèles énergétiques bas carbone de demain se prêtent infiniment mieux que ceux hérités de l'ère des fossiles à une dissémination spatiale de la ressource de nature à lutter contre les fractures territoriales. Pour y parvenir, il faut organiser le volet atténuation de la politique climatique territoriale sur le même schéma que celui précédemment défini pour l'adaptation.

Premièrement, il faut construire un système d'information rigoureux et homogène sur les règles de comptabilisation des émissions territoriales. Celles résultant de l'usage des énergies fossiles, ce qui est assez simple, mais aussi celles liées au milieu vivant en incluant les potentiels de stockage-déstockage de carbone. À l'échelle territoriale comme dans la négociation internationale, la constitution d'une métrique robuste et partagée est le socle sur lequel se construit toute politique ambitieuse.

Ensuite, les citoyens et les territoires ne sont pas égaux dans leur capacité d'agir face au réchauffement. Pour rehausser leurs ambitions, l'État doit en premier lieu s'assurer que les bonnes incitations soient transmises. Nous y reviendrons. Il doit aussi veiller à transférer de la ressource pour équilibrer les capacités d'action entre territoires. Au nom de ce principe, il serait pertinent d'intégrer un critère basé sur le prix du CO<sub>2</sub> dans la clé de répartition régissant les dotations financières de l'État vers les régions et les communes.

Enfin, l'action publique doit intervenir chaque fois qu'une réponse collective est préférable à la somme des actions individuelles. C'est ici qu'interviennent les synergies entre acteurs et entre secteurs que l'État ne voit pas et peut, encore moins, mettre en œuvre. D'où la nécessité de déléguer une grande partie de l'action d'atténuation aux régions et aux communes.

Pour accroître la résilience du pays face au risque climatique comme pour accélérer sa marche vers la neutralité carbone, il convient de reterritorialiser la politique climatique en transférant plus de responsabilités et plus de moyens aux régions et aux municipalités, mais aussi en leur imposant une évaluation bien plus stricte de leur action. L'un ne va pas sans l'autre. De notre point de vue, c'est le premier enjeu de la fin du quinquennat d'Emmanuel Macron sous l'angle climatique : le citoyen est las du « *Make our Planet great again* ». Il réclame du concret. Du local. On ne lui a guère expliqué comment étaient fixés les objectifs de réduction d'émission qui tombent de Paris. Mais il a bien compris que les transformations requises allaient impacter son mode de vie, car leur ambition n'a cessé d'être réévaluée.

## **DU FACTEUR 4 À LA NEUTRALITÉ CARBONE**

Jusqu'en 1992, la France n'avait pas de structure gouvernementale s'occupant des questions climatiques. Et, par conséquent, pas d'objectif de réduction d'émission de gaz à effet de serre. La Mission interministérielle de l'effet de serre (MIES) combla ce vide en 1992, en écho à l'adoption de la Convention-cadre sur le climat. La MIES a surtout joué un rôle d'interface avec les Nations unies et l'Union européenne.



Les premiers objectifs nationaux de réduction d'émission de gaz à effet de serre apparaissent en France en 2002. Ils ne sont pas discutés à Paris, mais à Bruxelles. Au terme de la négociation dite du « *burden sharing* », les membres de l'Union européenne adoptent une clé distribuant entre États membres les objectifs communs pris à Kyoto. Alors que l'Allemagne ou le Royaume Uni s'engagent sur des réductions respectives de 21 % et 18 %, la France a pour seul objectif de maintenir ses émissions moyennes de 2008-2012 au niveau de 1990. Ses négociateurs ont fait jouer que son électricité étant quasi décarbonée (nucléaire + hydraulique), il lui était plus difficile de réduire ses émissions que ses partenaires.

En réaction, la MIES va mettre en place un premier « plan climat », couvrant la période 2004 à 2012, qui décline par secteur l'objectif national de stabilisation négocié à Bruxelles. Il s'avère rapidement que l'objectif n'est pas contraignant. Le premier plan climat n'a donc jamais contraint ou incité qui que ce soit à réduire ses émissions au-delà du *business as usual*.

La MIES joua également un rôle de veille prospective. C'est dans ce cadre qu'émerge, à la suite d'un groupe de travail réuni en 2006, l'objectif dit du « facteur 4 » : diviser par quatre les émissions de gaz à effet de serre de la France entre 1990 et 2050<sup>7</sup>. Cet objectif est ensuite intégré dans la loi<sup>8</sup>. Il sert de cible à long terme à la politique climatique française jusqu'en 2017. Le facteur 4 se situe légèrement en dessous de la cible sur laquelle s'accorde au même moment l'Union européenne : une réduction comprise entre 80 et 95 % des émissions entre 1990 et 2050. Malgré la dénégation des pouvoirs publics français qui justifient l'écart au motif que l'électricité nationale est quasi décarbonée, l'ambition nationale apparaît alors en retrait sur celle de l'Europe.

Jusqu'en 2007, les objectifs d'atténuation se discutent dans un cercle étroit d'experts qui passent une bonne partie de leur temps dans les enceintes européennes ou onusiennes où sont débattues ces questions. Le climat est totalement périphérique. Le Grenelle de l'environnement, convoqué à l'automne 2007 par Nicolas Sarkozy et animé par Jean-Louis Borloo, va modifier la donne. Au lendemain du Grenelle, la MIES est intégrée au sein de la puissante direction générale de l'Énergie et du Climat du ministère de l'Écologie et un ensemble d'organismes consultatifs ouverts aux différentes parties prenantes sont constitués. Le dernier en date a été le Haut conseil pour le climat, inspiré du modèle britannique, qui a remis son premier rapport en juin 2019.

Sous l'angle climatique, le Grenelle de l'environnement est aussi l'occasion d'actualiser les objectifs de moyen terme à l'horizon 2020. Cette actualisation consiste à se mettre en accord avec les objectifs européens qui sont résumés par la formule dite du « trois fois 20 » : réduction de 20 % des émissions de gaz à effet de serre entre 1990 et 2020 ; 20 % de sources d'énergie renouvelable dans le mix énergétique en 2020 ; 20 % de gains d'efficacité énergétique. La France passe alors à un objectif de réduction de 10 % de ses émissions de gaz à effet de serre pour la partie qui n'est pas couverte par le système d'échange de quotas. Elle doit parallèlement atteindre 23 % d'énergie renouvelable la même année, l'objectif d'efficacité énergétique restant indicatif. Les engagements européens ont été actualisés à 2030, avec un objectif de réduction d'émission d'au moins 40 % à cet horizon.

À partir de 2015, ces objectifs de moyen terme sont déclinés en France dans des budgets carbone pluriannuels, établis dans le cadre d'un document dénommé « Stratégie nationale bas-carbone (SNBC)<sup>9</sup> ». La première SNBC couvrait la période 2015-2018 et les

deux périodes quinquennales subséquentes. La SNBC2 devrait couvrir les trois budgets carbone quinquennaux de 2019 à 2033.

La préparation de la COP21 à Paris a reposé sur les équipes du Quai d'Orsay sous la supervision de Laurence Tubiana. Elle était appuyée par l'Élysée avec l'aide de Nicolas Hulot occupant alors la fonction de conseiller du président Hollande pour la négociation climatique. L'objectif de neutralité carbone constituant la pierre angulaire du traité signé à la COP21, c'est tout naturellement que Nicolas Hulot, devenu le premier ministre de l'Environnement d'Emmanuel Macron, l'introduit dans le plan climat promu en juillet 2017. Un objectif qui devrait être intégré dans la Loi d'ici la fin 2019. On demande donc au Parlement d'entériner un objectif décidé deux ans auparavant. La fixation des objectifs climatiques n'est plus vraiment une affaire qui se décide entre experts. Elle reste néanmoins discutée à l'écart de la représentation nationale qu'il serait judicieux de mieux associer au processus.

En s'engageant sur la voie de la neutralité carbone, la France est, avec d'autres pays d'Europe du Nord, devenue une force motrice. Elle a précédé les instances européennes : si la Commission s'est prononcée en novembre 2018 en faveur de la neutralité carbone à l'horizon 2050, le Conseil et le Parlement européens n'ont pas encore adopté cette cible à long terme. Lors de son examen de passage devant le Parlement en juillet 2019, la nouvelle présidente de la Commission, Ursula von der Leyen, n'a pas manqué de la reprendre à son compte. L'étape suivante sera de la traduire dans les objectifs européens de moyen terme, sans doute en visant une baisse d'« au moins 50 % » des émissions à l'horizon 2030, à la place du « au moins 40 % » déjà acté. Quarante ou 50 % entre 1990 et 2030, c'est beaucoup ? Et pourquoi pas 75 % ou

80 %, puisqu'il faut aller vite ? Pour pouvoir en juger, examinons comment évoluent ces émissions.

Dans un premier temps, nous examinons les rejets de CO<sub>2</sub> résultant de l'usage des énergies fossiles et de la fabrication du ciment. Le CITEPA, l'organisme chargé d'établir l'inventaire national des gaz à effet de serre, fournit des données permettant de remonter jusqu'en 1960<sup>10</sup>. Nous examinons ensuite les émissions des autres gaz à effet de serre et les données sur les puits de carbone, documentées par le même CITEPA depuis 1990.

## **CE QUI FAIT BOUGER LES ÉMISSIONS DE CO<sub>2</sub>**

Pour construire une politique nous dirigeant vers une France ZEN, il convient d'avoir une bonne vision de l'historique. Cet historique nous renseigne sur les trajectoires passées, mais aussi sur les facteurs à l'origine des changements de tendance.

En 1960, la France rejetait 296 Mt de CO<sub>2</sub> (6,3 tonnes par habitant) dans l'atmosphère. Treize années plus tard, en 1973, on atteignait 540 Mt (10,2 tonnes par habitant). Quand la croissance est forte, qu'elle repose sur un transfert massif des travailleurs des champs vers l'usine et qu'elle se couple à un prix réel du pétrole en forte baisse, les émissions de CO<sub>2</sub> explosent (10 % l'an).

Le double choc pétrolier de 1973 et 1979 modifie profondément la dynamique par ses effets directs et indirects. À court terme, il provoque une double récession provoquant chaque fois un vif recul des émissions. À moyen terme, il change le régime de croissance qui se ralentit et se porte de plus en plus vers des activités de service. La trajectoire d'émission s'inverse. Le pic d'émission du pays est atteint en 1973, trente ans avant l'adoption de son premier objectif national en matière de réduction d'émission. Entre 1973 et

2018, les rejets de CO<sub>2</sub> reculent de 41 %, soit une baisse de 2 % par an. C'est plus que la baisse de 1,9 % par an visé par la première SNBC sur la période 2015 à 2018. Un objectif qui n'a pourtant pas été atteint !

Depuis 1979, la baisse des rejets de CO<sub>2</sub> a connu des phases d'accélération et de décélération. Entre 1979 et 1989, le recul a été d'un quart. Une baisse d'un quart en 10 ans, cela fait 3 % par an : c'est le rythme implicite du projet de SNBC à l'horizon 2033, présenté fin 2018 par le gouvernement<sup>11</sup>.

Entre le début des années 1990 et 2005, la dynamique de baisse des émissions s'épuise. Le contre-choc pétrolier est passé par là. L'économie n'est plus en récession, même si elle ne retrouve pas ses taux de croissance d'antan. La substitution des centrales électriques thermiques par le nucléaire joue de moins en moins. Nos rejets de CO<sub>2</sub> se stabilisent dans un corridor de 380-420 Mt.

À partir de 2005, la courbe d'émission de CO<sub>2</sub> repart à la baisse. Entre 2005 et 2018, les rejets de CO<sub>2</sub> reculent de 27 % (1,3 % l'an). Le recul est principalement le fait de l'industrie et de la transformation d'énergie (production d'électricité et de chaleur, et raffinage du pétrole). Les conditions macroéconomiques y contribuent. Le prix du baril s'envole entre 2005 et 2008. Les excès d'endettement se soldent par la récession de 2009 et la crise de l'euro du début de la décennie 2010. Il s'y ajoute l'introduction d'une tarification carbone via le système européen des quotas couvrant ces deux secteurs. Entre 2015 et 2017, le mouvement de baisse se bloque. Les émissions de CO<sub>2</sub> se figent sur un plateau. Plusieurs facteurs à l'origine de cette contreperformance climatique se conjuguent : contrechoc pétrolier ; amélioration sur le front de l'activité économique avec le règlement de la dette grecque ; dérive du système européen des quotas de CO<sub>2</sub> sur lequel le prix du CO<sub>2</sub>

touche le fond. En 2018, le prix du pétrole reprend des couleurs et celui du quota de CO<sub>2</sub> est multiplié par trois entre le début et la fin d'année. Les émissions de CO<sub>2</sub> reculent à nouveau de 5,5 %.

À l'image de l'Union européenne, la France a inversé sa trajectoire haussière des rejets de CO<sub>2</sub> dès les années 1970. Jusqu'en 2005, le régime de croissance et le prix du pétrole expliquent les à-coups de sa courbe d'émission. Les politiques énergétiques mises en œuvre répondent au renchérissement de l'énergie fossile et à l'objectif de sécurité d'approvisionnement. Après 2005, le prix des énergies et le régime de croissance continuent de jouer. Mais la politique climatique commence à faire sentir ses premiers effets, notamment via le système européen des quotas qui plafonne les émissions de la production d'électricité et de chaleur, du raffinage du pétrole et de l'industrie lourde.

Les objectifs de réduction de la prochaine décennie tels qu'ils sont traduits dans le projet de SNBC du gouvernement n'impliquent pas d'accélération forte de la vitesse de réduction des émissions de CO<sub>2</sub>. Les rythmes visés ont déjà été atteints dans le passé. Ils exigent en revanche de mordre bien plus sur les émissions de CO<sub>2</sub> diffuses, principalement liées au transport et à l'usage des bâtiments. Autrement dit, à celles qui sont le plus directement liées à nos modes de vie. Ce sont aussi celles susceptibles de provoquer les effets de boomerang les plus importants de la part des citoyens si on utilise pour les réduire des méthodes dont ils ne veulent pas ou qu'ils ne comprennent pas.

## **GAZ FLUORÉS ET CLIMATISEURS**

On retrouve cette question du mode de vie en observant l'historique des rejets de gaz fluorés dans l'atmosphère. Les gaz

fluorés représentent 4 % des émissions nationales. Ils sont constitués à 94 % de gaz de la famille des HFC venant en substitution des CFC proscrits par le protocole de Montréal sur la protection de la couche d'ozone ([chapitre 2](#)). Les rejets de HFC ont été multipliés par un peu plus de quatre entre 1990 et 2018. Ils sont stabilisés depuis 2012 et devraient fortement décliner dans les années qui viennent. Cette réduction va s'opérer grâce à l'usage d'autres fluides frigorigènes, déjà marginalement présents sur le marché, mais dont le coût pour produire du froid est, au moins au démarrage, supérieur à celui des HFC.

L'escalade des émissions de HFC est souvent présentée comme un simple effet de substitution des CFC dont le pouvoir de réchauffement est nettement plus élevé. Le climat gagnerait donc à l'échange. Ce serait le cas si le nombre de climatiseurs était resté constant. Depuis 1990, la part la plus importante de la croissance des émissions de HFC a résulté de l'extension de l'usage des climatiseurs dans les véhicules et les bâtiments. Il est donc abusif de présenter leur dynamique comme un simple effet de substitution. La pénétration croissante de la climatisation reflète des choix de mode de vie. Avec l'usage d'autres gaz réfrigérants, son empreinte climat va se réduire sans disparaître tant que l'électricité utilisée pour produire le froid ne sera pas totalement décarbonée.

## **CARBONE VIVANT ET Puits DE CARBONE NATIONAL**

Le second volet de la marche vers une France ZEN est la réduction des émissions de méthane et de protoxyde d'azote de l'agriculture, et le renforcement des puits de carbone. Dans les nomenclatures statistiques utilisées pour présenter les objectifs de neutralité carbone, ces deux séries d'information ne sont pas

rapprochées l'une de l'autre. À la suite du [chapitre 9](#), nous savons pourtant que le renforcement du puits de carbone passe par le déploiement de l'agroécologie qui permet simultanément de réduire les rejets agricoles de méthane et de protoxyde d'azote, et de stocker plus de CO<sub>2</sub> dans les sols.

Le calcul des émissions liées au carbone vivant est complexe car lié à un entrelacs de cycles biologiques multiples. Les rejets de méthane d'un ruminant dépendent de la façon dont il a été nourri et de son état de santé quand il digère ; ceux de protoxyde d'azote peuvent varier de 1 à 4 suivant qu'il pleut ou non après le passage de l'épandeur d'engrais dans le champ. Les calculs n'auront jamais la précision de ceux s'appliquant aux énergies fossiles ou aux procédés industriels. Du fait des efforts conjugués de l'INRA et du CITEPA, la France dispose d'un assez bon système d'évaluation de ces émissions.

Entre 1990 et 2018, les émissions d'origine agricole ont légèrement reculé sous l'action de deux facteurs : la diminution du nombre de bovins dans les élevages, résultant à titre principal de la gestion des quotas laitiers puis de leur abandon ; la réduction de l'usage des engrais chimiques en grande culture, reflétant les progrès de la fertilisation raisonnée et les contraintes croissantes pesant sur l'équilibre économique des exploitations. Contrairement à ce qui est observé pour le CO<sub>2</sub>, aucune cassure n'apparaît dans la courbe d'émission en 2005. La politique climatique n'a guère agi sur cette catégorie d'émission qui réagit au premier chef à la façon dont les agriculteurs répondent aux incitations de la PAC et à l'évolution des marchés de produits agricoles.

Les informations concernant la capacité d'absorption du puits de carbone national ne concernent que le puits terrestre. Elles reflètent principalement les variations des surfaces forestières d'une année



sur l'autre et le potentiel de croissance des arbres. Cette évolution présente une forme en U inversé : la capacité d'absorption du puits de carbone national s'accroît entre 1990 et la deuxième partie des années 1980. Elle tend à s'éroder depuis. Au-delà des accidents conjoncturels, comme les tempêtes Lothar et Martin qui ont mis par terre des millions d'arbres durant l'hiver 1999, les changements de tendance sont d'une interprétation délicate. Les variations de la capacité d'absorption du CO<sub>2</sub> résultant des changements de pratiques agricoles ne sont en particulier que partiellement prises en compte.

Pour cette catégorie d'émissions brutes et nettes, le pays se trouve donc dans une situation bien différente que pour le CO<sub>2</sub>. Il n'y a pas eu dans le passé un pic d'émission similaire et la métrique, encore très imparfaite, indique la complexité des actions à entreprendre dans les secteurs du carbone vivant. Ajoutons qu'il n'est pas fait mention dans l'inventaire de la capacité de stockage-déstockage de CO<sub>2</sub> par les océans. Le [chapitre 9](#) nous a pourtant montré le potentiel des zones littorales en la matière. Il serait surprenant qu'un pays disposant d'un vaste domaine maritime n'ait pas là un levier d'action potentiel. Il conviendrait de combler cette lacune en intégrant des informations sur le puits de carbone océanique dans l'inventaire national. Ce n'est pas le seul trou à combler.

## **LES TROUS DANS LA MÉTRIQUE**

Malgré son indéniable qualité, l'inventaire national comporte quelques trous qu'il va falloir combler pour mieux baliser la voie conduisant à la France ZEN.

L'insuffisante mesure du puits de carbone national en constitue une première illustration. Les informations disponibles dans l'inventaire sont loin d'être suffisantes pour guider l'action. Concernant le puits océanique, il n'y a pour l'instant aucune ligne dans l'inventaire. Nous venons de le voir. On aurait pourtant besoin de plus d'information pour mobiliser le potentiel de stockage du « carbone bleu ». Concernant le puits de carbone terrestre, la partie forestière est bien mieux couverte que celle concernant la capacité d'absorption des sols agricoles et des effets de leur conversion vers d'autres usages. Combler ces deux trous implique d'investir davantage de moyens techniques et humains pour améliorer une métrique bien plus complexe que celle du calcul des émissions brutes, mais tout aussi stratégique pour viser la neutralité carbone.

Un second trou de l'inventaire national, totalement aberrant, est la non-prise en compte des transports internationaux. Cela concerne le trafic aérien dont on a vu le dynamisme, le transport maritime de marchandises à longue distance et, de plus en plus, celui des personnes du fait de l'engouement pour les croisières. Ici, le problème n'a rien de technique. Les chiffres sont connus et calculés avec précision. Il suffit de les reporter sur les bonnes lignes. Si les blocages onusiens sont trop compliqués à surmonter, l'Union européenne peut, demain, convenir qu'on les intègre dans les inventaires de tous ses États membres et, par voie de conséquence, les inclure dans les engagements de réduction d'émission.

Troisième trou : l'inventaire national ne donne pas d'information concernant l'empreinte carbone de nos consommations. Si l'acier utilisé dans la voiture que j'achète a été coulé à Dunkerque ou à Foss, les émissions de CO<sub>2</sub> correspondantes sont comptabilisées dans l'inventaire. S'il a été coulé au Japon, en Inde ou en Corée, ce n'est plus le cas. Il existe désormais des tableaux estimant

l'empreinte carbone résultant de la demande en biens et services d'un pays. Pour les établir, on ajoute aux émissions sur le territoire une estimation de celles réalisées dans les pays d'où viennent les importations et on retranche des émissions territoriales ce qui est imputable aux exportations. Les calculs reposent sur de multiples approximations et ne fournissent que des ordres de grandeur. Ils révèlent que l'empreinte carbone de la France a progressé plus rapidement que ses émissions territoriales depuis 1990. Cela résulte de ses échanges extérieurs d'électricité et, plus encore, de la réduction de son outil industriel qui a perdu des parts de marché à l'exportation comme à l'importation. L'Allemagne qui a fait d'autres choix n'a pas un écart aussi important entre son empreinte carbone et ses émissions territoriales ([chapitre 8](#)).

Sur la base de ce constat, le Haut conseil pour le climat préconise, sans donner plus d'indications, « des mesures supplémentaires et une stratégie pour réduire l'empreinte carbone de la France<sup>12</sup> ». Pour aller dans cette direction, il conviendrait d'approfondir le diagnostic. Un préalable consiste à dissocier dans les émissions liées aux échanges extérieurs celles qui résultent d'échanges au sein de l'Union européenne de celles provenant d'échanges avec les pays tiers. Les objectifs climatiques de la France étant intégrés à ceux de l'Europe, un accroissement de l'empreinte carbone résultant des importations depuis l'Allemagne ou l'Italie n'accroît pas le niveau global des émissions si l'objectif de réduction européen est contraignant. Il n'en va pas de même lorsque notre consommation accroît les émissions en Asie ou en Amérique. Comme nous l'évoquons à la fin du chapitre, la question de l'empreinte carbone rejoint celle de la politique commerciale de l'Union européenne avec les pays tiers.

## **DU BON USAGE DE LA NORME**

Maintenant que nous avons bien en tête la métrique et les dynamiques passées d'émission, examinons comment l'État peut agir efficacement pour accélérer leur baisse dans le futur. Dans le débat public, l'impression prévaut parfois que face à l'emballlement des aiguilles de l'horloge climatique, il faut faire toujours plus et donc multiplier les leviers d'intervention de la puissance publique. Dans notre vision, l'efficacité et l'équité de l'action publique reposent plutôt sur une sélection judicieuse des instruments qui dynamise le corps social. Ces instruments sont au nombre de trois : les normes, l'investissement public et la tarification carbone.

Commençons par les normes. Dans l'agriculture et la forêt, il n'existe pas de normes sectorielles visant à réduire les émissions de méthane et de protoxyde d'azote ou à accroître la capacité d'absorption du CO<sub>2</sub>. Comme il n'y a pas non plus d'instruments économiques, il n'est pas étonnant que les courbes d'émission ne présentent pas de trace suggérant une quelconque influence de la politique climatique. Dans ces secteurs, seules les normes sanitaires jouent un rôle important, notamment dans la gestion des élevages pour la prévention des épidémies. Les normes environnementales sont assez compliquées à introduire. Elles prennent généralement la forme d'interdictions pures et simples de substances dangereuses pour la santé. Le feuilleton des glyphosates rappelle combien il peut être compliqué de s'accorder sur ce qu'on appelle une « substance dangereuse ».

Les normes sont en revanche largement utilisées pour la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> liées à l'usage des énergies fossiles et pour les gaz fluorés. Leur efficacité dépend des moyens que l'État investit dans leur élaboration et de la clairvoyance de sa stratégie de mise en œuvre. D'une façon générale, le bon usage des normes

consiste à éviter leur inutile multiplication et à concentrer les moyens sur celles qui ont une véritable capacité à accélérer les changements de comportement. Un point important est de s'assurer que leur application ne pèse pas trop sur les acteurs les plus fragiles. Les normes peuvent en effet avoir des effets anti-redistributifs aussi, voire plus, importants que les taxes. Les normes utilisées pour le CO<sub>2</sub> en France concernent le transport et les bâtiments.

Le scandale du « dieselgate » a révélé au grand public l'une des difficultés de l'action publique par les normes : lorsqu'elles sont contraignantes, les acteurs utilisent des stratégies de contournement pour y échapper. Certaines sont parfaitement légales. D'autres pas. Volkswagen en a fait l'expérience. Pour être efficaces, les normes doivent reposer sur des mesures rigoureuses des substances qu'on veut réduire ou éliminer. Il convient de leur associer un jeu de sanctions proportionné pour ceux qui ne parviennent pas à les appliquer ou cherchent à les contourner par des moyens légaux ou pas. Dans un premier temps, les normes sur les émissions de CO<sub>2</sub> des voitures ont été introduites dans le cadre d'une démarche volontaire copilotée par la Commission européenne et les associations de constructeurs européens et japonais. Relativement peu ambitieuse, cette démarche n'a pas accéléré le recul tendanciel des émissions moyennes par véhicule. Depuis 2015, le système n'est plus copiloté avec les constructeurs, ce qui a permis de rehausser son ambition. De 120 g de CO<sub>2</sub> par km, les émissions moyennes des véhicules neufs devront baisser à 95 g en 2021 pour atteindre 59 g en 2030. Ce rehaussement de l'ambition met l'Europe à niveau avec les normes chinoises. Il a drastiquement modifié les conditions de la compétition entre constructeurs automobiles qui ne

pourront être au taquet qu'à la condition de basculer rapidement vers de la motorisation électrique (batteries ou hydrogène).

En France, le système du bonus-malus est un dispositif national complémentaire destiné à faciliter l'atteinte de cette norme. Les acheteurs de voitures peu émettrices de CO<sub>2</sub> reçoivent des bonus financés par les malus réglés par les amateurs de véhicules fortement émetteurs. Ce dispositif inventé par Jean-Louis Borloo est populaire et semblait juste au démarrage : le porte-monnaie des ménages acheteurs de petites voitures peu émettrices est en général moins garni que celui des acheteurs de grosses cylindrées. Il subventionne désormais l'achat de véhicules électriques non émetteurs de CO<sub>2</sub>, nettement plus coûteux, achetés par les plus fortunés. Il tend donc à faire de l'anti-redistribution. Son efficacité environnementale est par ailleurs contrariée par l'effet rebond engendré par la distribution des bonus.

Les performances françaises en matière d'émissions de CO<sub>2</sub> liées à l'usage de bâtiments sont médiocres ([chapitre 8](#)), notamment quand on les compare à celles de l'Allemagne. En matière de logements neufs, cela se passe plutôt bien. Les normes thermiques ont été très fortement resserrées et semblent correctement appliquées. C'est une autre paire de manches pour la rénovation des logements anciens. L'État a pourtant mis beaucoup de moyens, notamment via de généreuses aides fiscales, des subventions ciblées sur les ménages à faible revenu et l'utilisation du système des certificats d'économie d'énergie, pour des résultats décevants. L'introduction d'une métrique via des normes a été plus tardive que pour les logements neufs. Un système d'« étiquettes énergétiques » mesurant la performance énergétique des bâtiments a été mis en place à partir de 2012. Ces étiquettes sont établies à la suite d'un diagnostic effectué par des entreprises spécialisées. Aucune

transaction d'un bien ancien n'est plus possible en l'absence d'un tel diagnostic.

L'amélioration des performances françaises pourrait résulter d'une utilisation plus stratégique de ce jeu de normes. Comme le montre la recherche particulièrement nourrie d'Édouard Civel<sup>13</sup>, cela implique en premier lieu d'investir des moyens pour garantir la rigueur de la mesure. Les progrès technologiques permettent de disposer d'appareils fournissant des mesures réelles de la consommation énergétique des bâtiments et non plus des estimations, imparfaitement harmonisées, par des diagnostiqueurs souvent rapidement formés. Garantir l'intégrité de la mesure est aussi stratégique, mais moins médiatisé, que de s'assurer que Volkswagen n'a pas trafiqué son moteur. Il convient ensuite de coupler cette information à un dispositif garantissant les résultats des travaux de rénovation engagés, comme c'est le cas en Allemagne. Faut-il rendre obligatoires ces travaux lors des transactions lorsque les biens sont mal classés ? C'est un point débattu au Parlement. Il serait judicieux de procéder à une expérimentation, car ce type d'obligation peut générer des stratégies de contournement qui annulent, voire inversent, l'effet recherché. Et la panoplie des aides, fiscales ou autres, de l'État ? Il convient en premier lieu de les simplifier et surtout de supprimer les multiples effets d'aubaine qui profitent aux ménages les plus aisés. L'argent public sera bien mieux utilisé en ciblant les aides sur les seuls ménages vulnérables. En particulier en augmentant l'investissement public dans la rénovation du parc de logement social.

## **LE LEVIER DE L'INVESTISSEMENT PUBLIC**

L'effort d'investissement public en faveur du climat est généralement considéré comme insuffisant. Si l'on veut plus de tramways et de vélos dans les villes et moins de véhicules individuels, cela implique des investissements lourds dans les équipements collectifs. Si on bascule d'un système de production d'énergie hypercentralisé vers des renouvelables se distribuant suivant les stratégies des différents territoires, les investissements dans les réseaux intelligents et le stockage deviennent cruciaux. La montée en régime du véhicule électrique implique également de reconcevoir le réseau de distribution des stations-service et d'investir dans des bornes de recharge. Il n'y a pas de débat là-dessus.

Ramener la stratégie de l'investissement public à une simple question de manque qu'il suffirait de combler en accroissant le volume des engagements est pourtant une erreur de diagnostic. La transition énergétique implique un double mouvement : investir dans les actifs bas carbone ; désinvestir des actifs carbonés liés à l'usage des fossiles. L'État et les acteurs publics doivent agir sur les deux fronts. Cela concerne en premier lieu le calibrage des investissements publics dont ils ont directement la charge.

La partie la plus visible de l'investissement public concerne les infrastructures énergétiques et de transport. Il faut aussi y inclure les bâtiments, en particulier le parc de logement social précédemment évoqué. Pour leur plus grande partie, ces investissements sont conduits par les collectivités territoriales et des entreprises de réseau à capital public et missions d'intérêt général. Le calcul économique et l'intégration d'un prix indicatif du CO<sub>2</sub>, parfois dénommé « valeur climat », devraient aider à constituer ces infrastructures sans gaspiller de capital. Cela conduit à des choix difficiles. Une forme majeure de gaspillage consiste à doubler : investir dans les infrastructures bas carbone sans désinvestir des



infrastructures supportant l'économie des fossiles. Cela engendre des gaspillages de capital et retarde la perspective de la neutralité carbone. Illustrons le point par un exemple.

Le CDG Express est le projet de ligne ferroviaire devant rattacher l'aéroport Roissy-Charles de Gaulle à la capitale. Cette troisième liaison entre Paris et son aéroport devrait coûter d'après ses promoteurs un peu plus de 1,5 milliard. C'est probablement plus écologique de prendre le train qu'un taxi et surtout infiniment plus efficace aux heures de pointe, comme peuvent le constater tous les voyageurs débarquant dans des aéroports étrangers disposant d'une telle infrastructure. Mais est-ce le bon choix sous l'angle de la transition énergétique ? Avec ce 1,5 milliard on pourrait investir dans les infrastructures existantes. Pour une part, moderniser la ligne B du RER dont les usagers mesurent quotidiennement les carences, mais aussi amorcer la reconversion de l'autoroute A1 en en faisant un prototype de l'infrastructure bas carbone de demain faisant circuler des véhicules électriques, collectifs ou en autopartage, autonomes et régulés grâce à un système d'information perfectionné. Il y aurait à terme deux infrastructures de transport décarbonées, alors que le projet du CDG Express doublonne avec le maintien des services classiques de l'autoroute d'hier et sa ligne de RER d'un autre âge.

L'investissement dans la recherche et développement est un levier majeur de l'action publique pour préparer le monde de demain. La marche vers la France ZEN pose la question des moyens de la recherche publique engagés dans le domaine du carbone vivant et de l'énergie.

Nous avons déjà évoqué la nécessité de renforcer les moyens de la recherche pour comprendre les mécanismes physiques et biologiques à la base des émissions de l'agriculture et du

fonctionnement du puits de carbone. Ce deuxième pilier de la neutralité carbone est beaucoup moins bien documenté que le volet énergétique. Il mérite plus de recherche fondamentale et surtout une multiplication des recherches appliquées pour construire une métrique qui tienne demain la route.

Sous l'angle énergétique, la question de l'investissement en recherche et développement renvoie avant tout à la réallocation des moyens et programmes existants. Les deux instituts de recherche de référence, le Commissariat à l'énergie atomique (CEA) et l'Institut français du Pétrole et des Énergies nouvelles (IFPEN), ont mobilisé des moyens de recherche de grande qualité, reconnus à l'international, sur le nucléaire et les énergies fossiles. Pour l'État, la première question est moins d'accroître ces moyens que de les allouer en fonction des priorités du pays en matière de transition énergétique. Il convient de désinvestir de l'atome et du pétrole pour mieux investir dans les renouvelables, le stockage de l'électricité, les réseaux intelligents...

L'enjeu est particulièrement crucial pour le CEA qui, avec un budget supérieur à 4 milliards d'euros, est le premier centre de recherche publique du pays, mobilisant la plus grande partie des ressources publiques allouées à la recherche sur l'énergie. Le CEA a déjà alloué une partie de ses moyens au climat, puisqu'il abrite l'Institut Pierre-Simon-Laplace. Il a également développé l'Institut national de l'énergie solaire. Ce rééquilibrage reste partiel, la grande majorité des ressources du CEA continuant d'être dédiée au nucléaire. Cette répartition reflète les choix passés du pays. Est-elle conforme à ses choix futurs ?

Cela dépend de la place qu'on accorde au nucléaire dans la transition énergétique. Le nucléaire produit une électricité non carbonée, ce qui justifie pour certains la poursuite de son

développement. Mais il génère d'autres risques et immobilise beaucoup de capital, ce qui freine la bascule vers les renouvelables. On a bien du mal à trancher ce dilemme au sommet de l'État où subsiste un tropisme nucléaire. Débattre pendant un quinquennat complet, celui de François Hollande, de la date de fermeture de la centrale de Fessenheim, sans véritablement trancher à la fin, ne fait guère avancer la question. La première programmation pluriannuelle de l'énergie sous le quinquennat d'Emmanuel Macron a également botté en touche : elle reporte à plus tard la décision sur les moyens de production qui remplaceront le parc actuel. Autrement dit, on conserve l'option de construire d'autres centrales nucléaires pour remplacer les anciennes, malgré les déboires en cascade de l'EPR de Flamanville. L'indécision et l'absence de vision sur le mode de désinvestissement de l'énergie nucléaire vont coûter cher au pays. Une vision stratégique conduirait à l'anticiper de façon proactive en investissant dans les techniques de démantèlement des centrales anciennes, un marché considérable sur le plan économique que la France risque de perdre, et en investissant dans le capital humain pour préparer les reconversions professionnelles.

L'incapacité de l'État à mener une stratégie claire de désinvestissement du nucléaire dont la place sera amenée à se réduire dans tous les scénarios est l'exemple à ne pas suivre. La transition bas carbone exige une stratégie autrement plus large de désinvestissement des énergies fossiles. Notre système économique repose sur la logique de l'empilement ([chapitre 1](#)). Il ne sait pas désinvestir. L'État doit donc impulser et accompagner ce désinvestissement pour réduire les coûts de transition. La bonne référence serait plutôt la reconversion des charbonnages dans le Nord et l'Est de la France qui a exigé une implication forte des pouvoirs publics et l'investissement de pas mal de fonds publics. Un

problème d'actifs échoués, à l'époque, non pour des raisons climatiques, mais du fait de la perte de leur rentabilité due à l'épuisement des gisements les plus accessibles. La marche vers la France ZEN va exiger des reconversions de même nature, mais à l'échelle nationale et pas uniquement des bassins miniers. L'État ne semble pas prêt à y faire face, car il sous-estime l'échelle des restructurations à opérer.

Les actifs qui vont s'échouer du fait de la transition énergétique sont multiformes. Comme on vient de le voir, ils peuvent prendre la forme d'infrastructures ou de programmes de recherche. D'outils industriels comme les usines automobiles où l'électrification va bousculer l'organisation du travail et supprimer des emplois. Mais aussi d'équipements utilisés par les ménages qui perdent brusquement de leur valeur, ou dont l'usage est limité ou interdit par les nécessités de la transition énergétique. Dans certains cas, l'État a contribué à cette situation en incitant hier ces mêmes ménages à investir dans les actifs auxquels il faut aujourd'hui renoncer. C'est très exactement ce qu'il a fait pour les voitures diesel, en revenant sur des avantages fiscaux historiques. Il s'est alors retrouvé face à la fronde des gilets jaunes qui ont réussi à bloquer le relèvement de la taxation de l'énergie pourtant votée par la représentation nationale et supportée par Nicolas Hulot, l'une des figures les plus populaires du pays.

## **PRIX DU CO<sub>2</sub> ET ACTIFS ÉCHOUÉS**

Parmi les outils à la disposition de l'État, la tarification carbone joue un rôle tout à fait particulier. Techniquement, elle peut aisément être mise en place pour toutes les émissions de CO<sub>2</sub> provenant de l'utilisation d'énergie fossile. Elle modifie alors le prix relatif des biens

et services au prorata de leur contenu en CO<sub>2</sub>. C'est le seul instrument qui envoie à l'ensemble des acteurs de l'économie des incitations requises pour accélérer la transition énergétique.

À court terme, la tarification carbone incite à économiser les énergies fossiles en commençant par les plus émettrices de CO<sub>2</sub>. Les gains peuvent être élevés, car il y a beaucoup de façons d'utiliser le capital installé en réduisant son empreinte climatique : on peut rouler moins vite, mieux régler son radiateur, optimiser les mouvements de sa flotte de camion ou changer l'ordre dans lequel on utilise les centrales électriques à partir du parc installé. Ces bénéfices climatiques de court terme suffiraient souvent à justifier l'introduction de la taxe. Ils sont loin d'être les seuls.

Sitôt que le prix du CO<sub>2</sub> monte, il fait apparaître l'ampleur des actifs échoués et incite à les déclasser. Pour les énergéticiens, cela veut dire abandonner les centrales à charbon, puis l'exploitation des pétroles non conventionnels, puis... Pour les industriels, cela va sortir du marché les procédés ou équipements gros utilisateurs d'énergie fossile qui ne pourront pas être reconvertis. Pour les ménages, ce sont les logements énergivores et les voitures trop gourmandes en carburants d'origine fossile qu'il va falloir déclasser. Si la trajectoire du prix du CO<sub>2</sub> est prévisible, cela permet aux acteurs économiques d'anticiper ces déclassements et de régler en conséquence leurs investissements dans les solutions alternatives. La taxe carbone agit donc sur les structures économiques en écartant graduellement la partie du stock de capital dépendante des énergies fossiles. Mais pour que cela fonctionne, il faut que les acteurs à qui s'applique la taxe disposent des ressources leur permettant d'investir dans les solutions alternatives. C'est ici qu'intervient le volet distributif. Pour ne pas en avoir tenu compte, le projet français de taxation carbone a buté sur l'écueil des gilets

jaunes. Avant d'examiner les voies de sortie possibles, tentons de mieux diagnostiquer ce qui a mis le feu aux poudres.

## **POUR UNE TAXE CARBONE REDISTRIBUTIVE**

Le dispositif actuel de taxation carbone a été introduit par la loi de finances pour 2014, à la suite des travaux réalisés au sein d'un comité *ad hoc* chargé de faire des propositions : le comité pour la fiscalité écologique que l'auteur de cet ouvrage a eu l'honneur de présider. Sous la conduite de l'économiste Katheline Schubert, spécialiste de la question, la question distributive y a fait l'objet de nombreux débats entre parties prenantes. Sans mesures d'accompagnement, la taxe carbone fait en effet de l'anti-redistribution<sup>14</sup> : elle taxe en proportion davantage les ménages modestes. En valeur absolue, ces ménages consomment moins d'énergie que les riches, mais en proportion de leur revenu, la charge afférente est nettement plus lourde. Une taxe carbone proportionnelle aux émissions de CO<sub>2</sub> ampute davantage leur pouvoir d'achat. L'efficacité environnementale comme la justice climatique appellent des mesures contrariant ce type d'inégalité.

Sur la base de ce constat, le comité pour la fiscalité écologique a recommandé d'instituer, simultanément à l'introduction de la taxe carbone, une « compensation forfaitaire, sous forme d'un crédit d'impôt dirigé sur les déciles de revenu les plus faibles et dégressif en fonction du niveau de revenu<sup>15</sup> ». Plus précisément, il recommandait d'utiliser un tiers des recettes de la taxe pour empêcher que les foyers les plus modestes ne subissent une amputation de leur pouvoir d'achat. Une autre préconisation était d'éliminer les « niches fiscales » dont bénéficient certaines catégories partiellement ou totalement exonérées de la fiscalité sur

les énergies fossiles<sup>16</sup>. Les gouvernements successifs n'ont pas exactement suivi ces recommandations.

La taxe carbone a été introduite dans la loi de finances 2014, simultanément à un alourdissement de la fiscalité sur le diesel pour combler graduellement l'avantage indu sur l'essence. Les députés ont voté une trajectoire prévoyant une hausse de la taxe carbone de 7 €/t en 2014 à 22 € en 2016. Pour les années suivantes, la trajectoire a été révisée à la hausse, notamment à l'arrivée de Nicolas Hulot au ministère de l'Écologie qui a proposé d'accélérer le mouvement en portant la taxe carbone à 86 €/t de CO<sub>2</sub> en 2022. Une trajectoire qui a été votée par le Parlement dans le cadre de la loi de finances pour 2018.

Comme l'introduction de la taxe carbone a été concomitante au contre-choc pétrolier qui a vu le cours du baril reculer entre 2014 et 2016, elle a été indolore. La baisse des prix hors taxe des combustibles fossiles a contrarié l'effet de son introduction. Les ménages ont commencé à la ressentir en 2017 et surtout en 2018 quand le prix du pétrole a fortement remonté alors que s'accélérait le relèvement de la taxe carbone et sur le diesel décidé au début du quinquennat d'Emmanuel Macron. Pris en étau, les ménages les plus affectés par ce renchérissement, ceux des lotissements et des ronds-points qui n'ont souvent guère d'alternatives à la voiture, ont commencé par signer une pétition puis à se rassembler pour réclamer la suppression de cette taxation inéquitable. Les mesures d'accompagnement préconisées par le comité *ad hoc* ne devaient-elles pas éviter ce genre d'écueil ?

À la place des redistributions forfaitaires préconisées, le gouvernement a introduit le « chèque énergie », un instrument qui porte assez mal son nom. Il ne s'agit pas d'un chèque, mais d'un bon d'achat exclusivement destiné aux énergies de chauffage (fioul

domestique et gaz naturel) ou, le cas échéant, à des travaux d'isolation de la maison. Impossible de l'utiliser pour faire son plein d'essence. Le gouvernement a bien tenté de faire croire que la prime à la casse des vieux véhicules diesel pouvait faire office de mesure sociale d'accompagnement. Ce n'était guère crédible. La vérité est que seules les recommandations sur la trajectoire de la taxe ont été appliquées. Cela met de l'argent dans les caisses de l'État. Celles concernant la redistribution de ses recettes au profit des ménages les plus vulnérables sont restées dans les cartons des ministères !

Et la suppression des niches fiscales ? À l'image de la fiscalité énergétique dans laquelle elle s'est logée, la taxe carbone comporte quelques gros trous dans la raquette. Depuis 2013, les gouvernements successifs n'ont pas fait preuve de témérité pour les éliminer. C'est donc à juste raison qu'on a pu s'offusquer sur les ronds-points que l'ouvrier ou l'artisan utilisant sa voiture pour se rendre au travail soit mis à contribution, alors que le touriste partant en fin de semaine pour Barcelone ou Marrakech en soit exonéré. Deux poids, deux mesures.

Face à l'ampleur de la fronde, le gouvernement n'a pas supprimé la taxation du CO<sub>2</sub>, mais a bloqué sa montée en régime. À 46 €/t de CO<sub>2</sub>, la France reste donc l'un des pays du monde à taxer de façon non anecdotique ses émissions de CO<sub>2</sub>. Ce blocage est-il définitif ? En réponse à la crise des gilets jaunes, le gouvernement a créé le Haut conseil pour le climat et également une nouvelle instance de démocratie participative : une Convention citoyenne sur le climat, regroupant 150 citoyens tirés au sort, chargés d'envoyer des propositions au gouvernement en matière de reprise de la taxation carbone. À supposer que celui-ci veuille les appliquer, cela ne le dispensera pas de soumettre ensuite la question aux députés et sénateurs qui, seuls, sont en mesure de donner le go pour un



nouveau départ de la taxe carbone dans le cadre de la loi de finances.

Il est des cas où une telle démocratie participative débloque des situations. Cela semble avoir joué pour la libéralisation de l'avortement et du mariage gay en Irlande. Dans le cas de la taxe carbone, il conviendrait de gérer les recettes avec un objectif redistributif ambitieux. L'une des difficultés est qu'il n'existe pas un instrument unique permettant une telle redistribution, mais un maquis assez complexe de canaux d'aides destinées aux ménages vulnérables. Cette complexité de la machine redistributive, accentuée par l'introduction du chèque énergie, génère beaucoup d'iniquité. Elle défavorise en particulier les travailleurs pauvres, disposant de ressources professionnelles qui les excluent d'une partie des aides versées sous condition de ressource. C'est la raison pour laquelle nous avons proposé de coupler la montée en régime de la taxe carbone à une réforme fiscale introduisant un revenu universel d'existence et réhabilitant la fonction redistributive de l'impôt direct. À chaque relèvement de la taxe carbone, le revenu d'existence serait augmenté de façon à injecter du pouvoir d'achat au bas de la pyramide des revenus<sup>17</sup>.

Une telle réforme n'aura manifestement pas lieu durant l'actuel quinquennat, même si l'idée fait son chemin. Il subsiste cependant de multiples actions à conduire pour améliorer les incitations transmises par la taxation du carbone, à commencer par l'action sur les niches fiscales qui sont autant de subventions aux énergies fossiles dont le pays ne parvient pas à se débarrasser. Il y a également l'action que la France peut mener sur le plan européen pour faire de la tarification carbone un outil crédible de la marche vers l'Europe ZEN.

## UN PRIX MINIMUM DU CO<sub>2</sub> POUR TOUTE L'EUROPE

Depuis 2005 (1990 si on se réfère aux pays scandinaves), l'Europe a constitué un laboratoire sans équivalent où a été testée la tarification carbone. L'impression qui prévaut dans le grand public est que cette tarification est compliquée, voire incompréhensible. Qu'elle génère des trafics frauduleux permettant à des délinquants d'amasser des pactoles en détournant le système de ses finalités. Qu'elle provoque d'inutiles crises sociales, comme celle des gilets jaunes. Alors, surgit une douce mélodie : plutôt que de taxer le citoyen, aidons-le à réaliser les transformations structurelles requises avec des subventions et des crédits d'impôt. Et tant pis pour l'« effet rebond » que de telles politiques ne manqueront pas d'avoir ([chapitre 8](#)). La courbe d'expérience européenne devrait conduire les politiques à ne pas succomber à l'attrait de ce genre de mélodie.

Jusqu'en 2005, les conditions propres à chaque pays européen et les variations du prix du pétrole expliquent les trajectoires d'émission de CO<sub>2</sub>. Le paysage change singulièrement avec le démarrage en 2005 du système d'échange de quotas de CO<sub>2</sub> qui s'applique aux grandes installations énergétiques et industrielles. L'année 2005 marque une rupture de tendance similaire à celle qu'a connue l'Europe au moment des chocs pétroliers des années 1970. Les émissions de CO<sub>2</sub> s'orientent à la baisse dans la plupart des pays. Cette baisse s'interrompt au milieu des années 2010, quand l'Europe ne parvient pas à enrayer la dérive de son marché carbone et l'effondrement du prix du quota. Le prix du CO<sub>2</sub> se redresse en 2018 et 2019 ? Les émissions repartent à la baisse, de façon spectaculaire dans certains pays. Le prix du CO<sub>2</sub> n'explique pas tout, mais il est devenu impossible d'interpréter les trajectoires européennes d'émission sans son aide. Pour s'en convaincre,

examinons le cas du Royaume-Uni. Le gouvernement britannique a choisi de contrarier la baisse du prix du quota en instituant en 2011 un prix plancher. Le pays n'a pas connu le pallier interrompant la baisse des émissions entre 2015 et 2017. Depuis le démarrage du système des quotas, il les a réduites nettement plus rapidement que le reste de l'Europe.

Malgré toutes les vicissitudes ayant affecté son pilotage, le système d'échange de quotas de CO<sub>2</sub> est un actif essentiel de l'Union européenne. Mais c'est un dispositif inachevé et beaucoup trop compliqué. Malgré une réserve dite de « stabilité », il n'y a pas de mécanisme régulateur permettant de prévenir une chute (ou une envolée) du prix en cas de choc non anticipé<sup>18</sup>. Surtout, il ne couvre qu'une fraction décroissante des rejets européens de CO<sub>2</sub>, laissant sur le bord de la route ceux liés au transport et à l'usage des bâtiments. Pour accélérer la décarbonation de l'économie, il convient d'améliorer la prévisibilité du prix du quota et d'élargir la couverture de la tarification carbone à l'ensemble des émissions.

Pour améliorer la prévisibilité du prix du quota, un certain nombre de gouvernements, dont la France, militent pour l'institution d'un prix plancher. Cela reviendrait à appliquer à l'échelle européenne ce que les Britanniques ont réalisé avec succès chez eux. Le dispositif préconisé prévoit également un prix plafond. On obtiendrait alors un « corridor » de prix à l'intérieur duquel pourrait fluctuer le prix du quota en fonction de l'offre et de la demande<sup>19</sup>. Sitôt que le plafond ou le plancher seraient atteints, le prix du quota resterait fixé au plancher ou au plafond. Il se transformerait ainsi en quasi-taxe. On dit alors que le système devient hybride, car il relie taxation et plafonnement des émissions. En réalité, si les quotas sont tous mis aux enchères comme le recommandent la plupart des économistes, ce système revient à taxer le CO<sub>2</sub> avec une certaine flexibilité et en

mutualisant les objectifs de réduction d'émission du CO<sub>2</sub> à l'intérieur de l'Europe.

Il n'y a pas de difficulté technique à introduire un tel corridor. On pourrait même coupler son introduction à une simplification du dispositif institutionnel devenu d'une extrême complexité. Il y a en revanche deux problèmes politiques majeurs liés aux impacts distributifs d'une telle réforme. Le premier concerne les pays d'Europe de l'Est dont les économies sont moins diversifiées qu'à l'ouest et souvent tributaires du charbon. Une condition de réalisation est donc d'utiliser une partie des recettes des enchères, désormais davantage prévisibles grâce au corridor de prix, pour accélérer leur reconversion économique. En clair, il faut transférer des ressources depuis les pays riches vers les autres, comme dans un accord climatique international ambitieux. L'autre volet concerne les industriels qui vont également demander des protections supplémentaires. L'une des réponses possibles serait d'instituer un mécanisme d'ajustement aux frontières taxant le contenu carbone des produits quand ils entrent dans l'espace européen. Cette position est défendue par le gouvernement français. Techniquement, elle est complexe à mettre en place. Économiquement, elle risque de surprotéger les industries traditionnelles soumises aux quotas au détriment d'autres secteurs plus stratégiques pour la transition énergétique. Une meilleure réponse serait d'accélérer la reconversion de ces vieilles industries.

La seconde action à conduire consiste à étendre la tarification carbone à l'ensemble des rejets de CO<sub>2</sub> provoqués par l'usage des énergies fossiles non couverts par le dispositif des quotas. Il faut pour cela tarifier les émissions diffuses, provenant à titre principal du transport et de l'usage des bâtiments. Dans ces secteurs, une partie des pays pratiquent déjà, à l'instar de la France, une taxation

nationale avec des niveaux de prix très hétérogènes : de 1 €/t pour la taxe de rendement polonaise, qui n'a jamais contribué à réduire la moindre émission de CO<sub>2</sub>, à 120 €/t en Suède, le pays industrialisé aux plus faibles émissions par habitant malgré la rigueur de son climat. Si l'Europe s'aligne sur le prix polonais, cela ne sert à rien. Si elle s'aligne sur le prix suédois, on risque de créer un mouvement de gilets jaunes transnational, même en prévoyant de redistribuer massivement le produit de la taxe, comme il convient de le faire. Il faut donc s'accorder sur un prix minimum, plus précisément sur une trajectoire de prix minimum, en laissant les Suédois et les autres pays qui le souhaiteraient aller au-delà s'ils veulent progresser plus rapidement vers la neutralité carbone. Une voie possible serait de réformer le dispositif fiscal en incorporant une composante carbone minimale dans la taxation de l'ensemble des énergies fossiles utilisées en Europe. La Commission a tenté de le faire dans le passé, sans succès. L'autre voie consiste à étendre la couverture du système européen d'échange de quotas simultanément à l'introduction d'une trajectoire de prix minimal du CO<sub>2</sub>.

Il n'y a aucune bonne raison technique ou économique d'avoir exclu plus de la moitié des émissions de CO<sub>2</sub> du système européen en 2005. Techniquement, cela ne pose aucun problème de les inclure : cela est pratiqué avec succès depuis plusieurs années sur le marché carbone commun en Californie et au Québec. Politiquement, le parcours est semé d'embûches. Il se heurte à l'opposition d'une partie des États membres. À celle de nombreux lobbies, tels ceux du transport aérien ou maritime, qui se satisfont de la mollesse des contraintes s'appliquant à eux. Mais, surtout, cela impliquerait de s'attaquer aux enjeux redistributifs concernant les ménages à l'échelle européenne. Une règle assez simple serait de redistribuer une bonne partie du produit des enchères, disons les

deux tiers, de façon égalitaire à chaque résident européen. On recréerait par ce biais une tarification carbone redistribuant du pouvoir d'achat vers les plus modestes. Une telle voie serait contraire à l'une des lignes de partage les plus étranges du fonctionnement de l'Europe, consistant, au nom du principe de subsidiarité, à laisser aux États membres le soin de gérer les conséquences sociales des politiques communes pourtant décidées à l'échelle communautaire. La prise en compte du changement climatique ne nous incite-t-elle pas à déplacer ces lignes héritées du monde d'hier ?

## **BREXIT, EURO, MIGRANTS, COMMERCE, AGRICULTURE**

Dans son discours d'investiture devant le Parlement européen, la nouvelle présidente de la Commission a abondamment évoqué le climat en s'engageant à rehausser les ambitions du continent et à accroître les investissements à cette fin. Rehausser les objectifs, c'est bien. Identifier les moyens à mettre en œuvre pour les atteindre, c'est mieux ! De notre point de vue, la bonne façon d'allouer ces moyens n'est pas de multiplier les normes et les aides dont le chevauchement est facteur d'inefficacité et souvent d'iniquité. Elle est de constituer la première zone économique du monde fonctionnant avec un prix minimum du CO<sub>2</sub> s'appliquant à tous les rejets liés à l'usage des énergies fossiles (transports internationaux inclus). Cela implique d'en assumer les conséquences distributives : utiliser la recette de la tarification carbone pour transférer de la ressource entre pays et au bénéfice des citoyens les plus vulnérables, et investir le reliquat dans la recherche et développement bas carbone. Cela enverrait un signal fort au reste du monde dans le cadre de la négociation climatique.

Mais construire une politique climatique, ce n'est pas se contenter d'« envoyer le bon signal prix », comme disent les économistes. Pas plus que sur le plan national, le climat ne doit rester à la périphérie des autres politiques à l'échelle européenne. Dans son même discours d'investiture, Ursula von der Leyen a évoqué cinq dossiers brûlants à traiter par la nouvelle équipe de dirigeants européens. Tous ont une dimension climatique, trop souvent passée sous silence.

Brexit dur, Brexit négocié ? C'est peu dire que la nouvelle Commission va devoir gérer un dossier d'une complexité singulière. Les modèles macroéconomiques standards prévoient une rupture de régime assez brusque pour les économies en cas de Brexit dur. Mais n'ont-ils pas été conçus pour démontrer cela ? Les banquiers continentaux jouent des coudes pour savoir qui, de Paris ou de Francfort, débauchera le plus de compétences financières à la place de Londres. Le Brexit est-il neutre pour l'action climatique de l'Union européenne ? Disons-le sans détour. C'est une mauvaise nouvelle. Sur le plan technique, les implications du retrait britannique sur le fonctionnement du système des quotas de CO<sub>2</sub> sont incertaines. Sur le plan politique, les engagements britanniques qui ont facilité l'atteinte des cibles européennes vont disparaître de la corbeille commune. L'Europe va perdre l'un de ses membres dont l'engagement en faveur du climat a été le plus constant depuis la publication du rapport Stern en 2006.

La performance de Mario Draghi à la présidence de la Banque centrale européenne est rétrospectivement largement saluée : il est considéré comme l'artisan du sauvetage de l'euro lors des secousses financières et monétaires provoquées par la crise grecque. Du coup, les regards se tournent vers la nouvelle arrivante : Christine Lagarde. Avec d'étranges interrogations sur sa

capacité à prévenir les crises monétaires. Et l'enjeu climatique ? Il n'est pas évoqué. C'est pourtant depuis la Banque centrale que se construisent les régulations prudentielles susceptibles de contraindre le système financier à mieux prendre en considération le risque climatique. Du fait de l'affaiblissement de la conjoncture, l'institution va reprendre ses achats de titres sur le marché financier. Va-t-elle intégrer des critères permettant de limiter l'empreinte climat de la banque centrale ? C'est un enjeu pour demain, pas pour après-demain !

L'afflux de migrants aux frontières de l'Europe multiplie les tensions au sein de l'espace européen. Il alimente un courant d'opinions favorable au rétablissement de frontières nationales pour stopper le flux d'entrées. Bien entendu, les causes de ces flux migratoires sont multiples et dépendantes des circonstances propres à chaque pays d'origine. Doit-on pour autant passer sous silence le facteur climatique dont l'impact ira croissant durant les prochaines décennies ? L'Europe devrait au contraire se pencher de plus près sur les liens entre les changements du climat et les pressions migratoires. Au vu de diagnostics correctement documentés, elle pourra ensuite mieux intégrer la dimension d'adaptation au changement climatique dans une politique de coopération renforcée avec les pays de la zone méditerranéenne et d'Afrique subsaharienne.

En écho à l'érection des frontières physiques : les barrières commerciales. Leur élimination à l'intérieur de l'Union pour construire une économie ouverte sur l'extérieur est au cœur du projet européen. Ce projet est contesté par la vague nationaliste qui veut remettre des frontières à tous les étages. L'objectif climatique étant commun aux États membres, sa compatibilité avec les règles de liberté du commerce ne concerne que la frontière commune avec



l'extérieur. L'idée qu'elle puisse se résoudre par l'intermédiaire d'un mécanisme correcteur aux frontières agissant comme un sas qui verdirait mécaniquement les flux commerciaux à l'entrée de l'Union est illusoire. Le continent devra lutter contre le dumping vert de façon sélective, en utilisant les instruments de prévention et de rétorsion commerciales avec deux priorités : l'ouverture la plus large possible de son marché intérieur aux pays moins avancés ; le renforcement de son appareil de production face à ses grands compétiteurs mondiaux dans les technologies bas carbone d'avenir. Pour le deuxième volet, elle devrait viser des objectifs ambitieux en matière d'exportation et de part de marché à l'international.

Terminons par le dossier agricole. Peut-être l'un des plus emblématiques des inerties de la mécanique européenne. Les premières règles de la politique agricole commune datent de 1962 : unicité du marché et prix agricoles garantis à la production, avec un mécanisme d'ajustement aux frontières similaire à celui aujourd'hui préconisé par le gouvernement français pour le CO<sub>2</sub>. Depuis 1984, les réformes se succèdent pour réorienter cette politique. L'ambition affichée est d'en réduire le coût budgétaire, notamment en subordonnant les aides directes aux agriculteurs à des conditionnalités environnementales. L'environnement comme moyen de réduire les aides agricoles ? L'Europe a certainement mieux à faire pour accélérer la transition vers l'agroécologie. La ligne destinée à l'agriculture dépasse encore 55 milliards dans le budget européen. Il convient de les utiliser pour construire le grand plan de réinvestissement dans la diversité du vivant dont nous avons tous tant besoin.

Cette escapade européenne montre que la politique climatique menée en France est étroitement liée aux décisions prises à l'échelle européenne. Depuis l'origine, les cibles de réduction

d'émission sont le fruit de négociations conduites au niveau européen. Il en va de même du nombre d'instruments mis en œuvre pour les atteindre comme les normes d'émission de CO<sub>2</sub> s'appliquant à l'industrie automobile, le système des quotas de CO<sub>2</sub> ou les financements climat de la Banque européenne d'investissement. Certains peuvent exprimer des formes de nostalgie face à cette perte d'indépendance en matière de prise de décision. C'est pourtant une grande chance que d'appartenir à ce continent qui peut, demain, renforcer son rôle moteur dans l'action tant la question du climat s'est immiscée dans le corps social. Ce devrait être aussi une source de motivation : on ne construira pas de France ZEN sans une Europe ZEN. Et réciproquement !

# Conclusion

## La promesse d'un monde meilleur

Dans l'approche privilégiée jusqu'à présent, j'ai tenté d'expliquer par quels mécanismes économiques les sociétés humaines ont augmenté l'effet de serre et provoqué le phénomène cumulatif du réchauffement global. Le postulat de départ est qu'une meilleure compréhension de ces mécanismes permet d'identifier les moyens d'action pertinents. J'ai également cherché à formuler des propositions concernant l'agencement de ces moyens, dans le contexte de la négociation internationale et en France. En conclusion, je voudrais élargir la perspective en m'interrogeant sur les liens entre politiques climatiques et croissance économique.

Face au tic-tac de l'horloge climatique, la courbe des émissions de gaz à effet de serre dans le monde n'a pas été inversée trente ans après la publication du premier rapport du GIEC. Cela pourrait laisser penser que rien ne se passe. Ou plutôt, que tout continue de se passer comme avant. Les prix de l'énergie et le rythme de la croissance économique resteraient les déterminants ultimes des émissions, bien plus puissants que l'action des politiques climatiques. La dynamique de l'empilement des sources d'énergie fossile serait irrémédiable, reflétant le jeu des vases communicants entre grandes zones économiques du monde : dans un premier

temps, montée des émissions de l'Europe et des pays d'industrialisation ancienne ; rééquilibrage à partir des années 1970 au profit des pays émergents, notamment ceux d'Asie, ces grands perdants de la mondialisation d'hier ; potentiel considérable d'augmentation des émissions en Afrique au sud du Sahara et dans les pays moins avancés à mesure qu'ils emprunteront les voies de la croissance économique.

Dans cette vision, les voies d'action face au changement climatique consistent à se résoudre à une décroissance subie. Toute la question est de savoir qui va supporter cette décroissance. Les pays occidentaux et le Japon qui, déjà, subissent depuis les années 1970 un ralentissement de leur régime de croissance ? Les pays émergents dont le rattrapage historique a permis, en trente ans, de diviser par près de trois le nombre d'habitants de la planète vivant sous le seuil de pauvreté ? L'Afrique au sud du Sahara et les autres pays moins avancés qui devraient renoncer à accroître leur production de biens et services alors que nombre de besoins essentiels ne sont pas couverts ? D'après la Convention climat de 1992 et le Protocole de Kyoto, la réponse est sans ambiguïté : ce sont les pays d'industrialisation ancienne qui doivent assurer l'ajustement. Le seul problème est qu'ils ne représentent plus un poids suffisant pour avoir une action déterminante en la matière. À l'évidence, la clef de l'inversion de la trajectoire des émissions se trouve désormais dans le monde émergent, et d'abord en Asie.

Cette vision d'une croissance irrémédiablement portée par les énergies fossiles est prégnante. Elle repose sur un historique de deux siècles de ce que nous avons appelé la « dynamique de l'empilement ». Elle est revendiquée haut et fort par des dirigeants comme Donald Trump ou Scott Morrison, le Premier ministre australien. Ces dirigeants gagnent des élections en déjouant les

pronostics des sondeurs professionnels. Ils vendent à leurs électeurs la promesse d'une prospérité retrouvée fondée sur les énergies fossiles d'hier, charbon inclus. Plus discrètement, nombre de dirigeants politiques sont convaincus qu'un renoncement trop rapide aux énergies fossiles se paye cash. En assurant aux pays du Sud un droit illimité à accroître leurs émissions au nom du droit au développement, le protocole de Kyoto reprenait implicitement cette vision d'une bijection entre le potentiel de croissance d'une économie et sa capacité à mobiliser des sources d'énergie fossile.

Du cheminement qui nous a conduit à approfondir les concepts de neutralité carbone et de justice climatique, je retiens deux propositions qui s'inscrivent en faux contre cette représentation. La première est que les baisses du coût des renouvelables et du stockage de l'électricité, couplées au potentiel du digital en matière de réseaux intelligents, modifient la donne. Au cœur du système économique, une bataille est engagée entre deux modèles de croissance : le modèle « thermo-industriel » d'hier reposant sur les énergies de feu ; le modèle post-carbone de demain basé sur les sources renouvelables et l'optimisation des flux d'énergie. La seconde proposition est que face aux impacts du réchauffement, la question du climat s'incruste dans le débat public en générant des contestations plus radicales des modalités de la croissance. Ces contestations vont s'amplifier dans les prochaines décennies avec le durcissement des impacts du réchauffement. Elles nous invitent à une réflexion plus fondamentale sur ce que nous appelons la croissance économique.

Dans *Factor Five*, Von Weizsäcker avance que « le communisme s'est effondré parce qu'il n'a pas permis aux prix d'exprimer la vérité économique et que le capitalisme peut aussi s'effondrer s'il ne permet pas aux prix d'exprimer la vérité écologique<sup>1</sup> ».

Cette vision me semble prémonitoire. Le réchauffement climatique agit comme un aiguillon qui contraint le système capitaliste à opérer une profonde mue pour sa propre survie. Il génère une masse croissante d'investissements et d'innovations apparaissant comme autant de bouées de sauvetage face à l'épuisement du modèle thermo-industriel. Ces changements ne sont pas de second ordre. Ils mettent face à face le capitalisme thermo-industriel et le capitalisme post-carbone. L'issue de cette guerre des capitalismes ne fait aucun doute : le modèle thermo-industriel a déjà perdu la bataille. Les outrances verbales d'un Donald Trump ou la victoire surprise d'un Scott Morrison aux élections australiennes ne peuvent masquer leur profonde incapacité à relancer ce modèle. Mais leur force de résistance retarde la transition énergétique et peut coûter cher en termes d'impacts climatiques. C'est la raison pour laquelle il faut hâter la transition énergétique via la tarification carbone et/ou des réglementations restreignant l'usage des énergies fossiles.

Un autre signe de cette bataille des capitalismes nous est donné par les Bourses. Très tôt, Wall Street s'est détournée du nucléaire, par crainte de perdre sa mise. Elle est en train de prendre ses distances face au capitalisme thermo-industriel : ce ne sont plus les valeurs pétrolières ou de l'industrie lourde qui caracolent en tête des indices boursiers américains, mais les valeurs de l'économie digitale et des services qui s'y associent. En Europe, les compagnies électriques se séparent de leurs actifs les plus carbonés, plus ou moins bradés ou regroupés dans des structures de défaisance similaires à celles mises en place pour sauver les banques au lendemain des krachs financiers. Symbole parmi les symboles : le report à répétition du projet saoudien de mise en Bourse de la société nationale Aramco qui fournit chaque année un baril de

pétrole sur dix produits dans le monde. Les investisseurs sont devenus méfiants face à ce qui aurait été considéré hier comme un véritable jackpot.

Le capitalisme post-carbone a recours à des méthodes éprouvées de développement que nous avons rencontrées en étudiant la bascule vers les renouvelables et la répartition des gains d'efficacité énergétique : innovation, accumulation de capital physique et humain, économies d'échelle, baisse des prix pour élargir les marchés. Sur le plan des organisations, il fonctionne en réseaux en modifiant les formes classiques du salariat. Il requiert enfin des régulations combinant des instruments réglementaires et économiques qui l'opposent de façon orthogonale à l'idéologie néolibérale développée dans les années 1980. Avec une exception majeure concernant les règles du commerce international qui brouille les repères. Signe des temps, les suppôts du capitalisme thermo-industriel sont devenus des protectionnistes avérés. Les capitalistes post-carbone surfent sur la liberté du commerce qui élargit les débouchés. Pour les concepteurs de modules photovoltaïques, de batteries, de réseaux de distribution, de piles à combustible, c'est le marché mondial qui compte et permet les changements d'échelle requis pour le déploiement des moyens de production post-carbone.

Vu le rôle qu'elle a joué dans la prise de conscience du risque climatique, on pourrait penser que l'Europe ouvre la marche et tire un maximum de bénéfices de cette mutation du capitalisme. Du fait de ses dysfonctionnements et de ses rigidités internes, ce n'est guère le cas. Le continent a financé le développement du photovoltaïque, mais n'a pas défendu sa propre industrie fournissant les équipements de production. Sa politique accélère la mutation vers la mobilité électrique, mais elle importe d'Asie les batteries,

l'organe clef du moteur de demain. Elle se veut la championne des réseaux énergétiques intelligents de demain, mais les géants de l'économie digitale qui dominent ces activités ont leurs ports d'attache aux États-Unis ou en Asie, à commencer par la Chine. La situation est peut-être réversible, mais elle appelle des réponses radicales de la part des dirigeants européens.

Ce capitalisme post-carbone ouvre-t-il la voie d'un monde « meilleur » ? Indubitablement, il est moins toxique pour le climat que le modèle thermo-industriel dont la prolongation nous mènerait collectivement à une régression de grande ampleur. À plan du régime de croissance, il peut temporairement contrarier, grâce à un mécanisme keynésien de relance par l'investissement bas carbone, la tendance au retour vers un régime de « stagnation séculaire » qu'anticipent un nombre croissant d'économistes à la suite des travaux de Gordon.

Au plan social, tout dépendra des rapports de force. Dans l'ouvrage *Le capital vert* co-écrit avec mon ami Pierre-André Juvet<sup>2</sup>, nous avons cherché à montrer que le capitalisme post-carbone pouvait générer autant, voire plus, d'exclusion et de pauvreté que son parent thermo-industriel. Nous y militons déjà pour une tarification environnementale à grande échelle avec une utilisation des recettes à vocation redistributive. Je n'ai fait que reprendre ces propositions dans l'analyse de la justice climatique en ajoutant deux compléments : au plan international, la question de l'adaptation aux impacts du changement climatique va devenir centrale ; elle pourrait contraindre les pays riches à débloquer des transferts financiers vers les pays le plus vulnérables et à tenir la promesse, jamais respectée jusqu'à présent, d'accroître substantiellement l'aide publique au développement. L'autre volet concerne l'accompagnement des restructurations qui va être crucial



sous l'angle de l'équité, du fait de l'étendue des actifs échoués que la transition climatique contraindra d'abandonner. Si ces politiques d'accompagnement sont correctement menées, la bonne nouvelle est que les modèles post-carbone peuvent améliorer la situation de l'emploi : les travaux de Quentin Perrier et de Philippe Quirion montrent qu'ils sont plus intensifs en travail que le modèle thermo-industriel<sup>3</sup>.

Si le capitalisme post-carbone porte de nombreuses promesses, il génère de nouvelles contradictions qui appellent à son dépassement. Les deux principales me semblent résulter de la persistance de la logique consumériste et de l'absence de réponse à la question de l'érosion de la biodiversité.

La logique consumériste du système capitaliste repose sur les techniques d'ouverture des marchés, enseignées dans toutes les bonnes écoles de commerce. Pour faire prospérer sa firme, il convient d'élargir son marché par des stratégies de prix, de qualité ou de « destruction créatrice » qui visent à fournir toujours plus de biens et services aux consommateurs et, ce faisant, à ajouter des points de croissance au PIB. Dès 1848, John Stuart Mill pointe dans ses *Principes d'économie politique* les limites d'une telle croissance quantitative qui asservit les citoyens. Il préconise en réaction un régime stationnaire. Contrairement à Malthus ou Jevons qui anticipaient un arrêt subi de la croissance pour cause de rareté des ressources naturelles (la terre pour Malthus, le charbon pour Jevons), Mill revendique son arrêt volontaire pour mieux répondre aux besoins non matériels de la société.

Quand aujourd'hui des économistes comme Herman Daly ou Tim Jackson comparent la courbe de croissance du PIB à celle des indicateurs de bien-être des sociétés, ils font une constatation similaire à celle de Mill : à partir d'un montant assez modeste de PIB

par habitant, l'augmentation de la quantité de biens et services génère bien un accroissement de richesse, mais plus guère de gains de bien-être. Sur la base de cette constatation, Jackson préconise de redistribuer la croissance entre pays, en visant, à partir d'un certain seuil de richesse, la « prospérité sans la croissance ». Cette prospérité pourrait peut-être même s'accroître grâce à la décroissance. Du fait des phénomènes de saturation ou de congestion, l'hyperconsommation peut en effet amputer le bien-être. Dans ce cas, réduire la consommation augmentera le bien-être collectif.

Ce mécanisme joue à plein en matière d'alimentation. La sécurité alimentaire implique d'assurer des apports minima en calories, protéines et autres substances nécessaires au développement des organismes humains. Malgré les progrès accomplis, ces apports sont encore insuffisants pour plus de 800 millions de personnes dans le monde. Le coût de la faim dans le monde reste considérable. Il est d'autant plus choquant qu'il n'y a aucune insuffisance globale de produits alimentaires. Bien au contraire : le trop-plein de biens alimentaires est devenu l'un des premiers facteurs de mortalité et de morbidité dans un nombre croissant de pays. À l'échelle mondiale, c'est l'autre face de l'insécurité alimentaire. Suivant la formulation provocante de Harari, elle contribue doublement à la progression du PIB : « L'obésité est une double victoire pour le consumérisme. Au lieu de manger peu, ce qui provoquerait une récession économique, les gens mangent trop puis achètent des produits diététiques – contribuant ainsi doublement à la croissance économique »<sup>4</sup>. Pour réduire le fléau de la faim, il faut investir dans les productions alimentaires locales, et surtout les infrastructures de stockage et distribution garantissant la continuité des approvisionnements, ce qui contribue à la croissance du PIB.

Pour réduire celui de la malbouffe, il convient de s'attaquer aux excès alimentaires ce qui, suivant les observations d'Harari, jouera doublement à la baisse de la croissance.

L'exemple de la consommation alimentaire nous ramène à la deuxième limite du capitalisme post-carbone : son impuissance face aux impacts croissants de l'activité humaine sur la diversité du vivant. Le capitalisme post-carbone repose sur le projet d'une décroissance sélective, concernant les seuls biens et services à forte empreinte carbone. Cela s'applique bien aux énergies fossiles dont le coût relatif peut être augmenté grâce à la tarification carbone ou aux réglementations. Comme le montre le modèle classique de croissance développé par Robert Solow, les substitutions entre facteurs de production répondent bien aux variations des prix relatifs. L'étude des puits de carbone et des émissions de l'agriculture nous a révélé que cette logique ne fonctionne guère pour tout ce qui concerne le carbone vivant, la deuxième jambe de la neutralité carbone. Pour une raison de fond : s'il existe des alternatives de plus en plus nombreuses aux énergies fossiles, l'idée qu'on pourrait trouver des substituts aux services procurés par la diversité du vivant est l'une des plus folles qu'on puisse imaginer. Il n'y a pas de substituts à la Nature. Nos choix économiques, et les règles économiques d'efficacité et d'équité afférentes, doivent donc s'effectuer à l'intérieur des mécanismes globaux permettant la reproduction de la vie : les fameuses « frontières planétaires » rencontrées au [chapitre 9](#), dont le changement climatique n'est que l'une des composantes.

Cette subordination des lois de l'économie à celles régissant la Nature est l'autre fondement de l'approche de la décroissance choisie, un courant de pensée dont le pionnier fut l'économiste Nicholas Georgescu-Roegen (1906-1994). Ce courant, animé en

France par l'économiste Serge Latouche et l'essayiste Paul Ariès, est souvent mal compris, car on l'assimile à une sorte de prosélytisme en faveur d'une croissance négative, comme si l'objectif était de vivre en récession permanente. L'approche de la décroissance consiste à rechercher d'autres critères pour fonder la prospérité en s'interrogeant sur les raisons qui conduisent nos sociétés à privilégier la logique du toujours plus, à commencer en matière de population. Une dimension sur laquelle les rapports du GIEC, contrairement à celui de l'IPBES sur la biodiversité, restent étrangement silencieux, comme si la démographie était un sujet tabou.

Le changement climatique questionne pourtant doublement sur la taille maximale de la population mondiale et sur sa répartition géographique. À la première question, Serge Latouche fait observer à juste raison que tout dépend de l'empreinte environnementale de chaque habitant. D'après lui, la Planète pourrait probablement héberger un milliard d'habitants avec l'empreinte moyenne d'Amérique du Nord, mais 23 milliards avec celle du Burkina Faso<sup>5</sup>. Je ne dispose pas d'éléments permettant de me prononcer sur cette fourchette. En revanche, il me semble que le freinage de la croissance démographique globale, amorcée dans les années 1960, constitue un paramètre qu'il conviendrait de mieux intégrer dans les travaux prospectifs sur le climat. Quant à la répartition spatiale de la population, elle est au cœur des stratégies d'adaptation. Sous cet angle, le capitalisme post-carbone surfe sur les effets d'agglomération en poussant à la création de mégapoles qui accumulent les richesses et les hommes au détriment des territoires périphériques. Une autre source de sa contestation par une partie de la population.

Si l'approche de la décroissance théorise les limites de la transition engagée dans le cadre du capitalisme post-carbone, elle ne fournit guère d'instruments économiques permettant de s'en affranchir. Quant à son projet politique, il reste marginal à l'échelle de la planète où il ne parle qu'à une toute petite minorité. C'est, à l'échelle locale, sur les territoires que se construisent des alternatives qui dépassent la simple logique du capitalisme post-carbone. J'ai eu la chance d'être associé à quelques-uns de ces projets territoriaux. J'en retiens un enseignement principal. L'action se déclenche quand les acteurs perçoivent le risque climatique, non plus comme un péril lointain et abstrait, mais comme une transformation qui les impacte déjà et dont l'ampleur ira croissante ; ceci conduit à monter des projets dans lesquels sont indissociablement couplées les actions de réduction des émissions et celles de renforcement de la résilience. Une fois lancés, ces projets se limitent rarement à la gestion du risque climatique. Ils portent des messages plus positifs qui donnent une valeur additionnelle aux modèles économiques qui font sens, car ils créent du lien social. Le film « Demain » co-réalisé par Cyril Dion et Mélanie Laurent en fournit des illustrations très convaincantes.

Une caractéristique de ces dynamiques territoriales me semble être de s'inscrire dans des dynamiques d'apprentissage qui prennent du temps. Le temps de mobiliser les moyens financiers, bien sûr. Mais surtout de mobiliser du capital humain. Les transformations à opérer ne sont pas des ajustements à la marge. Elles nécessitent des compétences bien supérieures à celles requises pour rester dans les organisations préexistantes. Tous les porteurs de projets territoriaux savent combien ces ressources sont rares à la maille locale. Il faut du temps pour les constituer. Cette inertie du temps contraste avec le rythme des aiguilles sur le cadran de l'horloge

climatique. C'est pourquoi je considère le terreau de l'innovation territoriale plus comme un laboratoire d'innovations servant de garde-fou face aux excès du capitalisme post-carbone et préparant son dépassement, plutôt que comme une alternative politique permettant de rapidement s'en affranchir.

Dans l'histoire de la pensée économique, la discussion sur les bienfaits de la croissance renvoie à Stuart Mill plus qu'à Malthus ou à Jevons. Ces auteurs sont contemporains des premières étapes de la révolution industrielle. Leurs théories questionnent le type de représentation que nous avons du rapport de l'homme à la nature. Une question qu'ont traitée les philosophes bien avant le démarrage de la révolution industrielle. Au moment d'achever cet ouvrage, j'aimerais partager avec le lecteur quelques enseignements qu'ils nous ont transmis et que nous avons tendance à oublier.

Commençons par la sagesse du monde antique. Dans son essai sur la « mystique de la croissance<sup>6</sup> », ma collègue Dominique Meda rappelle les enseignements des philosophes antiques qui conduisirent la démocratie grecque à édicter des règles supérieures pour limiter l'hubris des individus. L'envahissement des règles du marché n'est-il pas dans nos sociétés l'expression de cette même hubris ? Une hubris qui enferme le consommateur dans une frustration permanente et alimente les fantasmes les plus fous du courant transhumaniste : l'hybridation de l'homme avec des machines intelligentes pour renforcer sa toute-puissance et repousser indéfiniment la mort.

Ce fantasme me rappelle les « animaux-machines » de Descartes. Des êtres vivants, mis à la disposition de l'homme qui pourra les utiliser à sa guise pour mieux maîtriser la Nature. À partir de son fameux Cogito, Descartes a construit une représentation du monde centrée sur le sujet humain, d'après lui le seul être doté

d'une conscience et d'une capacité d'entendement lui permettant de se rendre maître de la nature grâce à la connaissance. C'est cette conception du monde qui a été reprise au siècle des Lumières par les Encyclopédistes et justifia les courants utilitaristes et économistes du monde contemporain.

Retournons au xvii<sup>e</sup> siècle. Un débat philosophique majeur oppose Descartes à Spinoza. L'un et l'autre libèrent la pensée occidentale des carcans dans lesquels l'enferma l'obscurantisme religieux du monde féodal. Le système philosophique de Spinoza oppose à l'individualisme cartésien la vision d'une humanité pensée comme maillon indissociable d'un tout. L'individu ne s'oppose désormais plus à la Nature, mais n'en constitue que l'une des modalités. La sagesse ne consiste pas à utiliser ses connaissances pour la dominer. Elle implique d'utiliser son entendement pour maîtriser ses passions et viser une meilleure harmonie avec le tout. Cette cosmologie spinozienne est d'une incroyable actualité à l'ère de l'Anthropocène. Elle nous recommande également de ne pas nous laisser dominer par nos appétits immédiats. De ne pas succomber à la fascination d'une satisfaction instantanée de tous nos désirs de consommation : « Nous préférons, sous la conduite de la Raison, un bien plus grand futur à un moindre présent, et un mal moindre présent à un plus grand futur<sup>7</sup> », nous rappelle le grand philosophe. Face au tic-tac de l'horloge climatique, ne devrions-nous pas revenir aux préceptes de base de l'éthique spinozienne ?

# Annexe 1

## **Séries longues (1800-2015) : Population, énergie et émissions de CO<sub>2</sub>**

Il est souvent difficile de retrouver des séries longues concordantes sur l'énergie et les émissions de CO<sub>2</sub>. Nous les avons réunies dans trois tableaux de synthèse, publiés dans une étude de la Chaire Économie du Climat :

Christian de Perthuis & Boris Solier, *La transition énergétique face au tempo de l'horloge climatique*, Chaire Économie du Climat, série Information & Débats, juillet 2018.

### **Source des données :**

Les données sur l'énergie avant 1970 sont tirées de l'ouvrage de Smil (2017), tableau pp. 241-242. Les données plus récentes sont issues des bilans de l'Agence Internationale de l'énergie (*World Energy Balances* : publication annuelle).

Les données sur les émissions sont reprises des tableaux de données du Global Carbon Budget. La source originelle est le Carbon Dioxide Information Analysis Center (CDIAC).

Les données sur la population mondiale sont issues de la division Population des Nations Unies à partir de 1950 et du bureau américain du recensement pour les données historiques de 1850 à 1950.



**Tableau 1.** Population, consommation d'énergie et émissions de CO<sub>2</sub> par habitant

|             | <b>Population mondiale<br/>(Millions d'habitants)</b> | <b>Consommation d'énergie<br/>(TEP*/hab)</b> | <b>Émissions de CO<sub>2</sub> (tCO<sub>2</sub>/hab)</b> | <b>dont émissions énergétiques<br/>(tCO<sub>2</sub>/hab)</b> |
|-------------|-------------------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| <b>1800</b> | 900                                                   | 0,59                                         | <i>nd</i>                                                | <i>nd</i>                                                    |
| <b>1850</b> | 1 200                                                 | 0,61                                         | 2,3                                                      | 0,2                                                          |
| <b>1900</b> | 1 650                                                 | 0,69                                         | 3,7                                                      | 1,2                                                          |
| <b>1910</b> | 1 700                                                 | 0,86                                         | 4,4                                                      | 1,8                                                          |
| <b>1920</b> | 1 860                                                 | 0,90                                         | 4,3                                                      | 1,8                                                          |
| <b>1930</b> | 2 070                                                 | 0,90                                         | 4,3                                                      | 1,8                                                          |
| <b>1940</b> | 2 300                                                 | 0,92                                         | 4,6                                                      | 2,1                                                          |
| <b>1950</b> | 2 536                                                 | 1,03                                         | 4,7                                                      | 2,3                                                          |
| <b>1960</b> | 3 033                                                 | 1,25                                         | 5,2                                                      | 3,0                                                          |
| <b>1970</b> | 3 701                                                 | 1,57                                         | 5,3                                                      | 3,9                                                          |
| <b>1980</b> | 4 458                                                 | 1,70                                         | 5,2                                                      | 4,2                                                          |
| <b>1990</b> | 5 331                                                 | 1,69                                         | 5,1                                                      | 4,0                                                          |
| <b>2000</b> | 6 145                                                 | 1,66                                         | 4,8                                                      | 3,9                                                          |
| <b>2010</b> | 6 958                                                 | 1,84                                         | 5,5                                                      | 4,5                                                          |
| <b>2015</b> | 7 383                                                 | 1,85                                         | 5,7                                                      | 4,6                                                          |

\* TEP = Tonne Équivalent Pétrole

Source : Chaire Économie du Climat, à partir des données de V. Smil (2017), CDIAC & ONU

*Croissance démographique et augmentation de la consommation d'énergie fossile par habitant sont les deux moteurs principaux des rejets anthropiques de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère.*

**Tableau 2.** Évolution du mix énergétique mondial (Millions de Tonnes Équivalent Pétrole)

|             | Charbon | Pétrole | Gaz   | Autres | Total  | Part des fossiles (%) |
|-------------|---------|---------|-------|--------|--------|-----------------------|
| <b>1800</b> | 9       |         |       | 520    | 529    | 2 %                   |
| <b>1850</b> | 53      |         |       | 676    | 729    | 7 %                   |
| <b>1900</b> | 536     | 17      | 6     | 596    | 1 133  | 49 %                  |
| <b>1910</b> | 810     | 37      | 13    | 652    | 1 462  | 59 %                  |
| <b>1920</b> | 920     | 83      | 22    | 761    | 1 681  | 61 %                  |
| <b>1930</b> | 948     | 164     | 56    | 909    | 1 857  | 63 %                  |
| <b>1940</b> | 1 084   | 248     | 82    | 1 024  | 2 109  | 67 %                  |
| <b>1950</b> | 1 180   | 510     | 196   | 1 439  | 2 618  | 72 %                  |
| <b>1960</b> | 1 445   | 1 039   | 419   | 2 344  | 3 790  | 77 %                  |
| <b>1970</b> | 1 622   | 2 218   | 933   | 4 185  | 5 807  | 82 %                  |
| <b>1980</b> | 2 075   | 2 866   | 1 346 | 5 507  | 7 581  | 83 %                  |
| <b>1990</b> | 2 447   | 2 947   | 1 840 | 6 542  | 8 989  | 80 %                  |
| <b>2000</b> | 2 496   | 3 358   | 2 239 | 7 679  | 10 175 | 80 %                  |
| <b>2010</b> | 3 900   | 3 690   | 2 964 | 8 901  | 12 801 | 82 %                  |
| <b>2015</b> | 4 152   | 4 020   | 3 218 | 9 511  | 13 663 | 83 %                  |

Source : Chaire Économie du Climat à partir des données de V. Smil (2017)

*Depuis 1800, l'empilement des sources primaires est le moteur des transitions énergétiques. Les nouvelles sources viennent s'ajouter à celles préexistantes, sans s'y substituer. Passer de ce schéma additif à un schéma substitutif sera la grande affaire de la transition bas carbone.*

**Tableau 3.** Émissions de CO<sub>2</sub> par source depuis 1850 (Millions de tonnes)

|             | <b>Charbon</b> | <b>Pétrole</b> | <b>Gaz</b> | <b>Usage des<br/>terres +<br/>Ciment</b> | <b>Total</b> | <b>Part des émissions<br/>énergétiques (%)</b> |
|-------------|----------------|----------------|------------|------------------------------------------|--------------|------------------------------------------------|
| <b>1850</b> | 198            |                |            | 2 548                                    | 2 746        | 7 %                                            |
| <b>1900</b> | 1 889          | 59             | 11         | 4 215                                    | 6 174        | 32 %                                           |
| <b>1910</b> | 2 853          | 125            | 26         | 4 548                                    | 7 552        | 40 %                                           |
| <b>1920</b> | 3 091          | 286            | 40         | 4 492                                    | 7 910        | 43 %                                           |
| <b>1930</b> | 3 161          | 557            | 103        | 5 105                                    | 8 926        | 43 %                                           |
| <b>1940</b> | 3 729          | 840            | 154        | 5 870                                    | 10 593       | 45 %                                           |
| <b>1950</b> | 3 924          | 1 551          | 356        | 6 011                                    | 11 842       | 49 %                                           |
| <b>1960</b> | 5 170          | 3 113          | 832        | 6 672                                    | 15 788       | 58 %                                           |
| <b>1970</b> | 5 706          | 6 744          | 1 808      | 5 443                                    | 19 700       | 72 %                                           |
| <b>1980</b> | 7 096          | 8 881          | 2 703      | 4 686                                    | 23 366       | 80 %                                           |
| <b>1990</b> | 8 650          | 9 138          | 3 762      | 5 518                                    | 27 069       | 80 %                                           |
| <b>2000</b> | 8 533          | 10 466         | 4 727      | 5 791                                    | 29 517       | 80 %                                           |
| <b>2010</b> | 13 979         | 11 393         | 6 219      | 6 988                                    | 38 579       | 82 %                                           |
| <b>2015</b> | 14 690         | 12 270         | 6 843      | 7 935                                    | 41 738       | 81 %                                           |

Source : Chaire Économie du Climat à partir des données du CDIAC et du Global Carbon Budget

*La transition énergétique opérée depuis deux siècles a conduit à un accroissement massif des émissions d'origine énergétique qui représentent 81 % des émissions totales de CO<sub>2</sub> en 2015, contre un peu moins de la moitié en 1950 et moins d'un tiers au début du siècle dernier.*

## Annexe 2

### Trois images du système énergétique en 2050

**Trois images du système énergétique en 2050**

|                                        | 1973 | 2015 | Scénarios 2050 |       |      |
|----------------------------------------|------|------|----------------|-------|------|
|                                        |      |      | JAUNE          | ROUGE | VERT |
| Consommation d'énergie par hab.*       | 1,55 | 1,86 | 1,86           | 2,0   | 1,2  |
| Part des énergies fossiles en %        |      |      |                |       |      |
| – Pétrole                              | 46,2 | 31,7 | 10             | 20    | 2    |
| – Charbon                              | 24,5 | 28,1 | 10             | 25    | 8    |
| – Gaz naturel                          | 16   | 21,6 | 30             | 30    | 15   |
| Émissions CO <sub>2</sub> (Gigatonnes) | 14,5 | 32,3 | 23,3           | 40,6  | 7,9  |

\* En tonnes équivalent pétrole      Source : C. de Perthuis, The Conversation, 14/11/2017

*Les données 1973 et 2015 sont tirées des bilans énergétiques de l'Agence Internationale de l'Énergie. Les projections de la consommation d'énergie par habitant et le mix énergétique correspondent aux trois images décrites au début du [chapitre 8](#). Les émissions de CO<sub>2</sub> en résultant sont calculées à partir des facteurs d'émission moyens observés en 2015 pour chacune des trois*

*sources fossiles. La population mondiale en 2050 est la même dans les trois scénarios : 9 770 millions de personnes, soit la projection médiane de la division Population des Nations Unies.*

# Remerciements

Ce livre n'aurait pas vu le jour sans la stimulation intellectuelle apportée par les membres de la Chaire Économie du Climat de l'université Paris-Dauphine. J'ai la chance de côtoyer ces chercheurs depuis bientôt une décennie. Je leur dis ici toute ma gratitude. L'écriture est un exercice plutôt solitaire. Au fil des chapitres, j'ai eu le plaisir de l'entrecouper d'échanges avec des relecteurs qui m'ont beaucoup apporté. Merci à : Matthieu Auzanneau, Ryadh Benlahrech, Claire Bérenger, Jérôme Boutang, Dominique Bureau, Édouard Civel, Nathaly Cruz, Anna Creti, Ivar Ekeland, Patrice Geoffron, Olivier Godard, Christian Gollier, Samuel Guy, Michel Lepetit, Olivier Massol, Raphaël Olivier, Jacques Percebois, Bruno Rebelle, Camille Tévenart, Mark Tuddenham, Marta Torre-Schaub, Edwin Zaccai, Olivier David Zerbib. Je remercie Dominique De Raedt, Lucie Verlinden, Astrid Legrand et toute l'équipe de la maison De Boeck Supérieur, d'abord pour m'avoir proposé cette aventure éditoriale, ensuite pour leur professionnalisme et enfin pour leur indulgence face à mes retards à répétition. Je n'oublie pas Brigitte, mon épouse, pour ses encouragements, ainsi que tous les enfants et petit-enfants, bien entendu associés à ces remerciements !

## Du même auteur :

*Le Monde après la reprise*, Economica, 1993.

*La Génération future a-t-elle un avenir ?*, Belin, 2003.

*La Finance autrement*, avec Jean-Pierre Petit, Dalloz, 2005.

*Le Développement durable*, avec Emmanuel Arnaud et Arnaud Berger, Nathan 2017 (5<sup>e</sup> édition).

*Idées reçues sur le changement climatique*, avec Anaïs Delbosc, Le Cavalier bleu, 2009.

*Pricing Carbon*, avec Denny Ellerman & Frank Convery, Cambridge University Press, 2010 (traduction française : *Le prix du carbone*, Pearson, 2010).

*Et pour quelques degrés de plus*, Pearson, 2010 (2<sup>e</sup> édition).  
(Version internationale : *Economic Choices in a Warming World*, Cambridge University Press, 2011).

*Le Capital vert*, avec Pierre-André Jouvét, Odile Jacob, 2013.  
(Version internationale : *Green Capital*, Columbia University Press, 2015).

*Le Complot climatique*, roman, L'Harmattan, 2014.

*Ils voulaient refroidir la Terre*, roman, à paraître.

# Notes

## INTRODUCTION

1. Amitav Ghosh, *Un déluge de feu*, traduction française, Éditions 10/18, 2015, p. 503.
2. Angus Maddison, *L'économie mondiale, une perspective millénaire*, Éditions de l'OCDE, 2001, p. 260 et 282.
3. Jean-Baptiste Say, *Traité d'économie politique*, 1803, édition électronique Institut Coppet, p. 197.
4. Harald Welzer, *Les guerres du climat, pourquoi on tue au <sup>xxi</sup><sup>e</sup> siècle*, Gallimard, collection « Essais », 2009.

## PARTIE 1

1. John R. McNeill, *Du nouveau sous le soleil. Une histoire de l'environnement mondial au <sup>xx</sup><sup>e</sup> siècle*, Seuil, collection « Points », 2010, p. 7-8.
2. Les sources statistiques utilisées pour les chiffrages de long terme sont détaillées dans l'[annexe 1](#).
3. Gilles Pison, *La démographie mondiale*, Le Monde Sup', 2015.

## CHAPITRE 1

1. Le port de La Rochelle-La Pallice est aujourd'hui le sixième en France par son trafic marchand. Il joua un rôle déterminant aux <sup>xvii</sup><sup>e</sup> et <sup>xviii</sup><sup>e</sup> siècles dans l'approvisionnement de la Nouvelle-France (colonies d'Amérique du Nord), mais recula ensuite en importance au profit de Nantes avec le développement du « commerce triangulaire » avec les colonies.



2. Vaclav Smil, *Energy Transitions. Global et National Perspectives*, Praeger, 2<sup>e</sup> édition, 2017.
3. Roger Fouquet et Peter J. G. Pearson, « The Long Run Demand for Lighting : Elasticities and Rebound Effects in Different Phases of Economic Development », *Economics of Energy & Environmental Policy*, vol. 1, n<sup>o</sup> 1, 2012, p. 85.
4. Lewis J. Perelman, August W. Giebelhaus, Mickael D. Yokel, *Energy Transitions : Long Term Perspectives*, Boulder, AAAS, 1981.
5. Loi n<sup>o</sup> 2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte.
6. Robert A. Hefner, *The Grand Energy Transition*, John Wiley & Sons, 2009.
7. Cesare Marchetti et Nebojsa Nakicenovi, « The Dynamics of Energy Systems and the Logistic Substitution Model », IIASA Research Report, IIASA, Laxenburg, Austria, RR-79-013, 1979.
8. Peter Lund, « Market Penetration Rates of New Energy Technologies », *Energy Policy*, 34, 2006, p. 3317-3326.
9. Benjamin K. Sovacool, « The History and Politics of Energy Transitions », in *The Political Economy of Clean Energy Transitions*, Oxford University Press, 2017, [www.oxfordscholarship.com](http://www.oxfordscholarship.com).
10. Ces conventions impactent particulièrement l'électricité nucléaire et l'électricité renouvelable. Des explications plus techniques sont apportées dans l'annexe de la première partie.
11. Jeremy Rifkin, *The Third Industrial Revolution : How Lateral Power Is Transforming Energy, the Economy, and the World*, Palgrave Macmillan, 2011.
12. Roger Fouquet, « The Slow Search for Solutions : Lessons from Historical Energy Transitions by Sector and Service », *Energy Policy*, 38, 11, 2010, p. 6586-6596.
13. Wil Roebroeks et Paola Villa, « On the earliest evidence for the habitual use of fire in Europe », *PNAS*, vol. 108, n<sup>o</sup> 13, 2011, p. 5209-5214.
14. Samuel Noah Kramer, *L'histoire commence à Sumer*, Flammarion, collection « Champs », 2009.
15. Will Steffen, Jacques Grinevald, Paul Crutzen et John McNeill, « The Anthropocene : conceptual and historical perspectives », *The Royal Society*, 369, 2011, p. 842-867.
16. Robert J. Gordon, « Does the New Economy Measure up to the Great Inventions of the Past ? », *Journal of Economic Perspectives*, vol. 14, n<sup>o</sup> 4, 2000.

17. Robert J. Gordon, « Is US Economic Growth over? Faltering Innovation Confronts the six Headwinds », *CEPR, Policy Insight*, n° 63, 2012.
18. Christophe Bonneuil et Jean-Baptiste Fressoz, *L'événement Anthropocène*, Seuil, collection « Points », 2016, p. 120.
19. IEA, IRENA, World Bank Group et WHO, *The Energy Progress Report*, 2018, <https://trackingsdg7.esmap.org/>.
20. Harold Hotelling, « The economics of exhaustible resources », *The Journal of Political Economy*, 39, 1931, p. 137-175.
21. Roger Fouquet et Peter J. G. Pearson, « The Long Run Demand for Lighting : Elasticities and Rebound Effects in Different Phases of Economic Development », *Economics of Energy & Environmental Policy*, *op. cit.*, p. 85.
22. Yves Crozet, *Hyper-mobilité et politiques publiques. Changer d'époque ?*, Économica, 2016, p. 25.
23. Hannah Ritchie et Max Roser, « CO<sub>2</sub> and other Greenhouse Gas Emissions », publié en ligne sur [OurWorldInData.org](http://OurWorldInData.org), 2018. Voir également <http://www.globalcarbonproject.org/carbonbudget/>.
24. Nous épargnons au lecteur la complexité et les subtilités de la comptabilité carbone. Le document de référence sur la question est le manuel du GIEC : *2006 IPCC Guidelines for national inventories*, accessible sur le site du GIEC (<http://www.ipcc.ch/>). Voir, pour la France, le site du CITEPA : <https://www.citepa.org>.
25. Cité dans Rodolphe De Coninck, « La logique de la déforestation en Asie du Sud-Est », *Cahiers d'Outre-Mer*, 51-204, 1998, p. 343.
26. Angus Maddison, *The World Economy : A Millennial Perspective*, OCDE, 2001.
27. Jean Fourastié, *Les Trente Glorieuses ou la révolution invisible de 1946 à 1975*, Fayard, 1979.
28. Eugène Ionesco, *Les chaises*, Gallimard, collection « Folio », 1973.
29. Bernard Durand, « La raréfaction prochaine des fossiles va contraindre de hâter la transition énergétique », *European Scientist Newsletter*, 25 juillet 2018.
30. Adolphe Nicolas, *Énergies : une pénurie au secours du climat ?*, Belin, collection « Pour la Science », 2011.
31. William Stanley Jevons, *The Coal Question : An Inquiry Concerning the Progress of the Nation and the Probable Exhaustion of Our Coal Mines*, Mcmillan, 1865.
32. Dennis L. Meadows *et al.*, *The Limits to Growth*, Universe Books, 1972.
33. Vaclav Smil, *Energy Transitions. Global et National Perspectives*, *op. cit.*, p. 224.

## CHAPITRE 2

1. L'expression est de John Houghton, ancien patron de la Météo britannique et auteur principal des trois premiers rapports d'évaluation du GIEC : John Houghton, *Global Warming. The Complete Briefing*, Cambridge University Press, 4<sup>e</sup> édition, 2009, p. 19.
2. IPCC, *Climate Change 2014 : Synthesis Report*, Fifth Assessment Report-IPCC, 2015.
3. World Meteorological Organization, *Statement on the State of the Global Climate in 2017*, WMO, n° 1212, 2018.
4. Jean Jouzel et Anne Debroise, *Le défi climatique. Objectif : 2 °C !*, Dunod, collection « Quai des Sciences », 2014, p. 33.
5. Wallace Smith Broecker et Robert Kunzig, *Fixing Climate : What Past Climate Change Reveal about the current Threat and how to Counter it*, Farrar, Straus and Giroux, 2008.
6. John Houghton, *Global Warming. The Complete Briefing*, op. cit., p. 91.
7. Emmanuel Le Roy Ladurie, *Histoire du climat depuis l'an mil*, Flammarion, 1967.
8. Will Steffen, Paul Crutzen, John McNeill, « The Anthropocene : Are Humans Now Overwhelming the Great Forces of Nature ? », *Ambio*, vol. 36, n° 8, 2007.
9. McNeill, *Du nouveau sous le soleil. Une histoire de l'environnement mondial au xx<sup>e</sup> siècle*, op. cit., p. 202.
10. Marie-Lise Chanin, Cathy Clairbaux et Sophie Godin-Beekman, *L'évolution de l'ozone atmosphérique : le point 2015*, rapport de l'Académie des sciences, Institut de France, 2015.
11. Guus J. M. Velders, Stephen O. Andersen, John S. Daniel, David W. Fahey et Mack McFarland, *The importance of the Montreal Protocol in protecting climate*, actes, National Academy of Science of the USA, 104, 12, 2007, p. 4814-4819.
12. IPC, 2015, p. 44.
13. Paul Samuelson, « Interactions between the multiplier analysis and the principle of acceleration », *Review of Economic Statistics*, 21, 1939, p. 75-78.
14. Voir sur le site <http://www.globalcarbonproject.org> : *10 Years of Advancing Knowledge on the Global Carbon Cycle and its Management*.
15. IPCC, 2014, Report of the Working Group III, p. 1110.
16. IPCC, 2014, p. 63.
17. Boris Vian, *L'Écume des jours*, Livre de Poche, 1947.

18. IPC, *Special Report : Global warming of 1,5 °C*, Summary for Policy Makers, 2018, p. 14.
19. John Houghton, *Global Warming. The Complete Briefing*, op. cit., p. 275.
20. Jean Jouzel et Anne Debroise, *Le défi climatique. Objectif : 2 °C !*, op. cit., p. 117.

## CHAPITRE 3

1. Colin McEvedy et Richard Jones, *Atlas of World Population History*, Penguin Books, 1978.
2. Amar Oulad Belkhir, Amar Bouziane, Abdelmadjid Chehma, Bernard Faye, « La filière viande cameline dans le Sahara septentrional algérien », *Revue des BioRessources*, 3 (2), 2013, p. 26-34.
3. Abdelkader Adamou, « L'élevage camelin en Algérie : quel type pour quel avenir ? », *Sécheresse*, 19 (4), 2008, 253-260.
4. Ali Khelifa, *Étude du système ancestral de captage et de distribution des eaux dans l'Oasis de Ghardaïa*, mémoire de Magister, Université de Ouargla, département hydraulique, 2008.
5. Boualem Remini, Bachir Achour et Rabah Kechad, « La foggara en Algérie : un patrimoine hydraulique mondial », *Revue des sciences de l'eau*, vol. 23, n° 2, 2010, p. 105-117.
6. Météo France, *Bilan climatique 2018*, <http://www.meteofrance.fr/climat-passe-et-futur/bilans-climatiques/>.
7. Jean Jouzel et al., *Le climat de la France au xx<sup>e</sup> siècle, tome IV : scénarios régionalisés*, ministère de l'Écologie et du Développement durable, 2014.
8. Camilo Mora et al., « Global risk of deadly heat », *Nature Climate Change*, vol. 7, juillet 2017, p. 501-507.
9. James Hansen et al., « Ice melt, sea level rise and superstorms : evidence from paleoclimate data, climate modeling, and modern observations that 2 °C global warming could be dangerous », *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16, 2016, p. 3761-3812.
10. Swiss Re, « Catastrophes naturelles et techniques en 2017 : une année de pertes record », *Institute sigma*, n° 1, 2018, p. 28.
11. Antonio Gaparrini et al., « Projections of temperature-related excess mortality under climate change scenarios », *The Lancet, Planetary Health*, vol. 1, n° 9, 2017, e360-e367.
12. Bernard Chevassus-au-Louis, *La biodiversité, c'est maintenant*, Éditions de l'Aube, 2013.

13. IPCC, Report of the Working Group II, 2015, p. 47-48.
14. Ulrich Beck, *La société du risque*, Flammarion, collection « Champs », 1986.
15. Edwin Zaccai, Valentine van Gameren et Romain Weikmans, *L'adaptation au changement climatique*, La Découverte, 2014.
16. Hervé Le Treut (dir.), *Les impacts du changement climatique en Aquitaine : un état des lieux scientifique*, Presses universitaires de Bordeaux, LGPA-Éditions, 2013.
17. Denis Salle et Hervé Le Treut, « Comment la région Nouvelle-Aquitaine anticipe le changement climatique ? », *Sciences Eaux & Territoires*, n° 22, 2017, p. 14-17.
18. Institut Ouranos, *Vers l'adaptation : synthèse des connaissances sur les changements climatiques au Québec*, Édition 2015, <https://www.ouranos.ca/synthese-2015/>.
19. Sylvie Franchette, *Le delta du Nil. Densités de population et urbanisation des campagnes*, ouvrage publié par l'ORSTOM et le CNRS, 1997.
20. Jared Diamond, *Effondrement. Comment les sociétés décident de leur disparition ou de leur survie*, Seuil, collection « Folio », p. 784-785.
21. John Houghton, 2015, p. 169-175.
22. Moritz Kraemer, *Climate Change Is A Global Mega-Trend for Sovereign Risk*, Standard & Poor's rating service, 2014.
23. Nicholas Stern, *The Economics of Climate Change. The Stern Review*, Cambridge University Press, 2008, p. 158.
24. Nicholas Stern, *The Economics of Climate Change. The Stern Review*, *op. cit.*, p. 404-415.
25. Robert O. Mendelsohn, William Nordhaus et David Shaw, « Climate impacts on aggregate farm values : Accounting for adaptation », *Agriculture and Forest Meteorology*, 80, 1996, p. 55-67.
26. Edwin Zaccai et Romain Weikmans, *The Conversation*, 4 septembre 2018.

## CHAPITRE 4

1. World Economic Forum, *The Global Risk Report*, 2018, p. 3.
2. François Jarrige et Thomas Le Roux, *La contamination du monde : une histoire des pollutions à l'âge industriel*, Seuil, 2017, p. 301-308.
3. Agence européenne de l'environnement, « Late lessons from early warnings : the precautionary principle 1896-2000 », *Environmental issue report*, n° 22/2001, janvier 2002.

4. Clive Hamilton, *Les apprentis sorciers du climat*, Seuil, collection « Anthropocène », 2013, p. 117-143.
5. Bjørn Lomborg, « Truth is the First Casualty of Global Warming », *The Project Syndicate*, décembre 2018.
6. Pablo Servigne et Raphaël Stevens, *Comment tout peut s'effondrer. Petit manuel de collapsologie à l'usage des générations présentes*, Seuil, collection « Anthropocène », 2015.
7. Jean-Pierre Dupuy, *Pour un catastrophisme éclairé, quand l'impossible est certain*, Seuil, 2002, p. 216.
8. Francis Chateauraynaud, « Halte au catastrophisme », *Courrier de l'UNESCO*, 2, 2018.
9. Pablo Servigne et Raphaël Stevens, *Comment tout peut s'effondrer. Petit manuel de collapsologie à l'usage des générations présentes*, op. cit., p. 227.
10. William Nordhaus, « Economic Growth and Climate : The Carbon Dioxide Problem, *The American Economic Review*, mai 1977.
11. William Nordhaus, *The Climate Casino. Risk, Uncertainty, and Economics for a Warming World*, Yale University Press, 2013.
12. Emmanuel Bovary, Gaël Giraud et Florent John Mc Isaac, « Coping With Collapse : A Stock-Flow Consistent Monetary Macrodynamics of Global Warming », *Ecological Economics*, 147, 2018, p. 383-398.

## PARTIE 2

1. Accord de Paris, article 4,1.

## CHAPITRE 5

1. « Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques » (CCNUCC ou UNFCCC en anglais), adoptée au Sommet de Rio de 1992 et ratifiée par plus de 190 pays (États-Unis inclus). Pour ne pas assommer le lecteur d'acronymes barbares, nous l'appelons Convention Climat dans le texte.
2. Valentin Belassem et Benoît Leguet, *Comprendre la compensation carbone*, Pearson, 2009, <https://lejournal.cnrs.fr/articles/ou-sont-passes-les-oiseaux-des-champs>.
3. <https://www.fijjairways.com>.
4. Shahbano Soomro, « ICAO's global offset mechanism draws worldwide attention to international aviation emissions », *Policy Brief*, 2016-02, Chaire Économie du Climat, 14 octobre 2016.



5. En réalité, l'estimation des émissions et des absorptions ne permet pas de boucler aussi facilement le compte et il faut introduire un ajustement statistique.
6. À long terme, le réservoir océanique se remplit également en stockant les carbonates issus de l'altération de roches comme les basaltes et les granites qui ne sont pas transformés par la photosynthèse.
7. Richard A. Houghton et Alexander A. Nassikas, « Negative emissions from stopping deforestation and forest degradation, globally », *Global Change Biology*, 2018, 24, p. 350-359.
8. Arnaud Gossement, *Projet de loi énergie – climat : le Gouvernement veut modifier certains objectifs de la politique nationale de l'énergie et du climat*, <http://www.arnaudgossement.com>, 7 février 2019.
9. Alain Quinet *et al.*, « La valeur de l'action pour le climat », *France Stratégie*, février 2019.

## CHAPITRE 6

1. *New York Times*, 2 juillet 1916, cité dans Frank T. Kryza, *The power of light : the epic story of man's quest to harness the sun*, McGraw Hill, 2003.
2. Jacques Percebois, *L'énergie solaire. Perspectives économiques*, collection « Énergie et Société », CNRS, 1975, p. 174.
3. Ian McEwan, *Solaire*, traduction française, Gallimard, 2011, p. 299-302.
4. Sauf mention contraire, nous utilisons dans cet ouvrage les chiffres de l'Agence internationale de l'énergie réunis sur le site dédié au rapport annuel *World Energy Outlook, 2018*, <https://www.iea.org/weo2018/>.
5. Interview de Daniel Lincot et Pere Roca i Cabarrocas, « Quel avenir pour le photovoltaïque ? », *CNRS Le Journal*, juin 2016.
6. International Technology Roadmap for Photovoltaic, *2018 Results*, p. 59-62.
7. Mason Inman, « Behind the Numbers on Energy Return on Investment », *Scientific American*, 1<sup>er</sup> avril 2013.
8. IPCC, *Rapport spécial sur les sources d'énergie renouvelable et l'atténuation du changement climatique*, résumé technique, 2011, p. 123-125.
9. Nous utilisons la notation CO<sub>2eq</sub> chaque fois qu'il est question de l'ensemble des gaz à effet de serre, convertis en CO<sub>2</sub> suivant leurs pouvoirs de réchauffement respectifs.
10. Base de données ADEM, <http://www.bilans-ges.ademe.fr>.
11. IEA, 2018, p. 349-356 et 605.

12. Peter Grösche et Carsten Schröder, « On the redistributive effects of Germany's feed-in tariff », *Empirical Economics*, 46 (4), 2014, p. 1339-1383.
13. Cédric Clastres, Jacques Percebois, Olivier Rebenaque et Boris Solier, « Cross subsidies across network users : renewable self-consumption », *Working Paper*, 2018-05, Chaire Économie du Climat, 2018.
14. IEA, IRENA, UN Statistics Division, World Bank et WHO, *Tracking SDG7 : The Energy Progress Report*, 2018, <https://www.irena.org/publications>.
15. « Global Energy Interconnection Development and Cooperation Organization », voir en particulier : *White Paper on Global Energy Interconnection*, <http://www.geidco.org>.
16. Philippe Bihouix, *L'âge des low tech*, Le Seuil, collection « Anthropocène », 2014.
17. World Bank, *The Growing Role of Minerals for a Low Carbon Future*, juin 2017.
18. Clément Bonnet, Samuel Carcanague, Emmanuel Hache, Gondia Seck et Marine Simoën, « Vers une géopolitique de l'énergie plus complexe ? », *Working Paper IFP-EN & IRIS*, janvier 2019.
19. Corinne Le Quéré et al., « Drivers of declining CO2 emissions in 18 developed economies », *Nature Climate Change*, vol. 9, 2019, p. 213-217.

## CHAPITRE 7

1. Hans-Werner Sinn, *The Green Paradox. A Supply-Side Approach to Global Warming*, MIT, 2012.
2. Dans tout ce chapitre, nous utilisons les statistiques de réserves du *BP Statistical Review*, édition 2018.
3. John R. McNeill, *Du nouveau sous le soleil. Une histoire de l'environnement mondial au xx<sup>e</sup> siècle*, op. cit., p. 132.
4. McGlade et Ekins, 2015, p. 189. The geographical distribution of fossil fuels unused when limiting global warming to 2 °C NATURE | VOL 517 | 8 JANUARY 2015.
5. International Energy Agency, *Coal Information Overview*, 2018.
6. Sylvie Cornot-Gandolphe, *Coal Exit or Coal Expansion ? A Review of Coal Market Trends and Policies in 2017*, IFRI, juillet 2018.
7. Brent Wanner, *Is exponential growth of solar PV the obvious conclusion ?*, International Energy Agency Newsroom, février 2019.
8. *The Economist*, « The black hole of coal », Briefing Indian Energy, 4 août 2018, p. 15-17.



9. Christine Shearer, Melissa Brown, Tim Buckley, *Chine at a Crossroads. Continued Support for Coal power Erodes Country's Clean Energy Leadership*, IEEFA, janvier 2019.
10. Carine Sebi et Bruno Lapillonne, « Does Coal Threaten the Global Energy Transition ? », Enerdata, février 2019.
11. <https://www.hybritdevelopment.com/>.
12. Matthieu Auzanneau, *Or noir. La grande histoire du pétrole*, La Découverte, 2015, p. 58.
13. Voir par exemple son ouvrage *Dormez tranquilles jusqu'en 2100*, Odile Jacob, 2015.
14. Nicolas Bouleau, *Le mensonge de la finance. Les mathématiques, le signal-prix et la planète*, Éditions de l'Atelier, 2018.
15. International Energy Agency, *Global EV Outlook 2018 : Towards cross-modal electrification*, 2018.
16. *The Economist*, « Bigger oil », Briefing ExxonMobil, 9 février 2019, p. 13-15.
17. Pour une information complète sur l'activité d'extraction pétrolière et gazière, consulter le site gouvernemental *Norwegian petroleum*, <https://www.norskipetroleum.no>.
18. Interview de Tod Lien sur le site Euractive, 8 février 2016.
19. In *Germany phases out coal to help stabilize our climate*, <https://www.pik-potsdam.de/news/press-releases>, 27 janvier 2019.
20. Hadrien Hainaut, Lola Gouiffes, Ian Cochran, Maxime Ledez, *Panorama des financements climat*, édition 2018, Institut I4CE, 2018, p. 2.

## CHAPITRE 8

1. Ernst von Weizsäcker, « A Long-Term Ecological Tax reform », in *Factor five*, Earthscan, 2009, p. 313-344.
2. Christian de Perthuis et Boris Solier, *La transition énergétique face au tempo de l'horloge climatique*, Chaire Économie du Climat, série « Information et débats », juillet 2018, p. 14-18.
3. William Stanley Jevon, *The Coal Question : An Inquiry Concerning the Progress of the Nation and the Probable Exhaustion of our Coal Mines*, Macmillan, 1865, p. 140.
4. Amory Lovins, « Energy savings resulting from the adoption of more efficient appliances : Another view », *Energy Journal*, vol. 9, 1988, p. 155-162.
5. International Energy Agency, *Global Energy and CO2 Status Report 2018*, mars 2019, p. 23.

6. Ernst von Weizsäcker, « A Long-Term Ecological Tax Reform », *op. cit.*, p. 327.
7. Yves Crozet, *Hyper-mobilité et politiques publiques. Changer d'époque ?*, *op. cit.*, p. 25.
8. Pharoah Le Feuvre, *Are aviation biofuels ready for take off ?*, IEA Website, 18 mars 2019.
9. International Energy Agency, *Energy Access Outlook, Special Report*, 2017 ; IEA, IRENA, UN Statistics Division, World Bank Group et WHO, *Tracking SDG7 : The Energy Progress Report*, 2018.
10. Édouard Civel, *The Red and the Green : essays on the economics of information in the sustainable habitat market*, thèse d'économie, Université Paris-Nanterre, Chaire Économie du Climat, 2019.
11. Shonali Pachauri *et al.*, « Policy trade-offs between climate mitigation and clean cook-stove access in South Asia », *Nature Energy*, 2016/01/11/online, vol. 1, 15010.
12. Adam B. Jaffe et Robert N. Stavins, « The Energy-Efficiency Gap : What Does It Mean ? », *Energy Policy*, 22, 1994, p. 804-810.
13. Fateh Belaïd, Salomé Bakalogloub et David Roubaud, « Direct rebound effect of residential gas demand : Empirical evidence from France », *Energy Policy*, 115, 2018, p. 23-31.
14. Isolde Devalière, Mathilde Clément et François-Xavier Dussud, *Suivi annuel de la précarité énergétique : un nouvel enjeu pour l'ONPE*, Observatoire national de la précarité énergétique, 23 novembre 2018.
15. Jérémy El Beze, *Les rôles de la substitution et de l'efficacité énergétiques dans la décarbonation du parc de logements en France*, thèse de doctorat, Université Paris-Dauphine-PSL, 2018, p. 47-48.
16. Association négaWatt, *Scénario négaWatt 2017-2050, dossier de synthèse*, janvier 2017, p. 14-34.
17. Kirsten S. Wiebe et Norihiko Yamano, « Estimating CO2 Emissions Embodied in Final Demand and Trade Using the OECD ICIO 2015. Methodology and Results », *OECD Working Papers*, n° 2016/5. Nos chiffres sont calculés à partir de la base de données de l'OCDE, accessible depuis le site.
18. Les données sur l'empreinte carbone doivent être considérées avec prudence, car elles sont le résultat de calculs complexes, reposant sur des données souvent estimées, tirées des matrices input-output utilisées en comptabilité nationale. Ces résultats ne sont pas totalement convergents suivant les sources, mais les ordres de grandeur se recoupent. Pour plus de précisions : *L'empreinte carbone. Note préalable à l'élaboration du troisième rapport gouvernemental annuel au titre de la loi dite « SAS » du 13 avril 2015 : « Les nouveaux indicateurs de richesse – 2017 »*, Ministère de l'Écologie,

CGDD-SES, document de travail n° 38, avril 2018. Tous les chiffres mentionnés dans le texte sont issus des tableaux téléchargeables sur le site de l'INSEE : *Indicateurs de richesse de la France – Empreinte carbone*.

19. Michael Carolan, *Cheaponomics. Le coût élevé des produits bon marché*, traduction française, De Boeck, collection « Planète en jeu », 2015.

20. Angus Deaton, « Health, Inequality, and Economic Development », *NBER Working Paper*, n° 8318, 2001.

## CHAPITRE 9

1. Christopher C. Wilmers *et al.*, *Do trophic cascades affect the storage and flux of atmospheric carbon ? An analysis of sea otters and kelp forests*, The Ecological Society of America, 2012, [www.frontiersinecology.org](http://www.frontiersinecology.org).

2. Oswald Schmitz, *The New Ecology, Rethinking a Science for the Anthropocene*, Princeton University Press, 2017, p. 34.

3. World Meteorological Organization, *Statement on the State of the Global Climate in 2018*, 2019, p. 10-11.

4. Aldo Leopold, *A Sand County Almanac and Sketches from Here and There*, Oxford University Press, 1949, p. 130-132.

5. Oswald Schmitz, *The New Ecology, Rethinking a Science for the Anthropocene*, *op. cit.*, p. 30-33.

6. À long terme, le réservoir océanique se remplit également en stockant les carbonates issus de l'altération de roches comme les basaltes et les granites qui ne sont pas transformés par la photosynthèse.

7. Les liens entre le fonctionnement de la pompe à carbone océanique et la biodiversité marine sont connus de façon lacunaire. C'est pourquoi le GIEC a inscrit à son programme de travail la préparation d'un rapport dédié à la question des océans dont la sortie a été postérieure à la fin de la rédaction de notre ouvrage.

8. IPBES, *Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services*, advance unedited version, 6 mai 2019, p. 12.

9. IPBES, 2019, p. 4 et 16.

10. Belinda Arunarwati Margono *et al.*, « Primary forest cover loss in Indonesia over 2000-2012 », *Nature Climate Change*, vol. 4, 2014, p. 730-735.

11. Calcul effectué à partir des moyennes mobiles sur trois ans des données officielles de l'INPE fournies par l'imagerie satellite, [https://rainforests.mongabay.com/amazon/deforestation\\_calculations.html](https://rainforests.mongabay.com/amazon/deforestation_calculations.html).

12. Gabriela Simonet, *La gestion des forêts tropicales comme levier d'atténuation du changement climatique : l'expérience des « projets REDD+ »*, thèse d'économie, AgroParisTech, ABIES, juin 2016.
13. Michel Griffon, *Qu'est-ce que l'agriculture écologiquement intensive ?*, Éditions Quæ, 2013.
14. Bill Mollison, *Permaculture Two : Practical Design and Further Theory in Permanent Agriculture*, Tagari, 1979, p. 1.
15. Thierry Caquet et Jean-Francois Soussana, *Réflexion prospective interdisciplinaire pour l'agroécologie*, INRA, avril 2019.
16. IPCC, AR5, tome III, 2014, p. 818-824.
17. Wen Wang, *Integrating Agriculture into the Chinese Mitigation Policies*, thèse d'économie, Université Paris-Dauphine, janvier 2015.
18. Sylvain Pellerin *et al.*, « Quels leviers techniques pour l'atténuation des émissions de gaz à effet de serre d'origine agricole ? », *Innovations agronomiques*, 37, 2014, p. 1-10.
19. Benjamin Dequiedt, *La réduction des émissions de gaz à effet de serre dans l'agriculture : une application au secteur des grandes cultures*, thèse d'économie, AgroParisTech, ABIES, décembre 2016.
20. <http://www.inra.fr/Grand-public/Rechauffement-climatique/Tous-les-magazines/Quatre-pour-1000.-Stockage-du-carbone-dans-le-sol#>.
21. Budiman Minasny *et al.*, « Soil carbon 4 per mille », *Geoderma*, 292, 2017, p. 59-86.
22. <http://www.livelihoods.eu/>.
23. Bernard Chevassus-au-Louis, *La biodiversité, c'est maintenant*, *op. cit.*
24. Institut Sylva et INRA, *Étude « Maraîchage biologique permaculturel et performance économique »*, <https://www.fermedubec.com/>, novembre 2015.
25. Sylvain Pellerin, Laure Bamière *et alii*, *Stocker du carbone dans les sols français, Quel potentiel au regard de l'objectif 4 pour 1 000 et à quel coût ?*, Étude INRA, juin 2019.
26. Projet Carbocage mené par l'ADEME et les chambres d'Agriculture, <https://pays-de-la-loire.chambres-agriculture.fr/publications/>.
27. Michael Clark et David Tilman, « Comparative analysis of environmental impacts of agricultural production systems, agricultural input efficiency, and food choice », *Environmental Research Letters*, vol. 12, 064016, 2017.
28. FAO, *L'état de la sécurité alimentaire et de la nutrition dans le monde*, 2018, <http://www.fao.org/state-of-food-security-nutrition/fr/>.
29. Yuval Noah Harari, *Sapiens. Une brève histoire de l'humanité*, Albin Michel, 2014, p. 408.
30. IPCC, 2018, p. 118-126.

31. IPBES, 2019, p. 25.
32. <https://www.cerdia.com/accoya.html>.
33. <http://www.akuoenergy.com/fr/agrinergie>.
34. Johan Rockström, « A safe operating space for humanity », *Nature*, 461, 2009, p. 472-475.

## PARTIE 3

1. Jean Jouzel et Pierre Larroustourou, *Pour éviter le chaos climatique et financier*, Odile Jacob, 2017.
2. Michael J. Sandel, *Justice*, traduction française, Flammarion, collection « Champs essais », 2009, p. 389.

## CHAPITRE 10

1. Marta Torre-Schaub et Blanche Lormeteau, « Les recours en justice climatique en France », numéro spécial de la *Revue Énergie, Environnement, Infrastructures*, n° 5, mai 2019.
2. Leslie Hook, « Oil majors gear up for wave of climate change liability lawsuits », *Financial Times*, 9 juin 2019.
3. Marta Torre-Schaub, « Changement climatique : la société civile multiplie les actions en justice », *The Conversation*, 31 mars 2017, p. 3.
4. Marta Torre-Schaub, « Le rôle des incertitudes dans la prise de décision aux États-Unis. Le réchauffement climatique au prétoire », *Revue internationale de droit comparé*, 59-3, 2007, p. 685-713.
5. Olivier Godard, *La justice climatique mondiale*, La Découverte, 2015, p. 18-30.
6. Olivier Godard, *La justice climatique mondiale*, *op. cit.*, p. 18.
7. Étienne Billette de Villemeur et Justin Leroux, « Tradable climate liabilities : A thought experiment », *Ecological Economics*, à paraître en 2019.
8. Amartya Sen, *L'idée de justice*, Flammarion, collection « Champs essais », 2009, p. 351.
9. Niklas Höhne, Michel den Elzen et Martin Weiss, « Common but differentiated convergence (CDC) : a new conceptual approach to long-term climate policy », *Climate Policy*, 2006, vol. 6, n° 2, 2006, p. 181-199.
10. Christian Gollier, *Le climat après la fin du mois*, PUF, 2019, p. 245-328.
11. Christian Gollier, *Le climat après la fin du mois*, *op. cit.*, p. 292.

12. John Rawls, *Théorie de la justice*, Seuil, collection « Essais », 1971, p. 326.
13. John Rawls, *Théorie de la justice*, *op. cit.*, p. 341.
14. Pierre-Noël Giraud, *L'inégalité du monde. Économie du monde contemporain*, Gallimard, collection « Folio actuel », 1996.
15. François Bourguignon et Christian Morrisson, « Inequality among World Citizens : 1820-1992 », *The American Economic Review*, vol. 92, n° 4, 2002, p. 727-744.
16. Thomas Piketty, *Le capital au xx<sup>e</sup> siècle*, Le Seuil, 2013.
17. Lucas Chancel, *Insoutenables inégalités. Pour une justice sociale et environnementale*, Les petits matins, 2017, p. 136.
18. Lucas Chancel et Thomas Piketty, *Carbon and inequality : from Kyoto to Paris*, Paris School of Economics, novembre 2015.
19. Branko Milanovic, *Inégalités mondiales*, La Découverte, 2016, p. 176.

## CHAPITRE 11

1. Garrett Hardin, « The Tragedy of the Commons », *Science*, vol. 162, n° 3859, 13 décembre 1968, p. 1243-1248.
2. Elinor Ostrom, « Polycentric Systems : Multilevel Governance Involving a Diversity of Organizations », in *Global Environmental Commons*, Oxford University Press, 2012.
3. IPCC, *Changement climatique : les évaluations du GIEC de 1990 à 1992*, premier rapport d'évaluation et suppléments de 1992, 1992, p. 71.
4. Stefan C. Aykut et Amy Dahan, *Gouverner le climat ? Vingt ans de négociations internationales*, Les Presses de Sciences Po, collection « Développement durable », 2015.
5. Jean Tirole, *Politique climatique : une nouvelle architecture internationale*, rapport au CAE, octobre 2009.
6. Christian de Perthuis, *L'accord de Paris : la négociation peut commencer !*, Chaire Économie du Climat, série « Information & débats », n° 44, avril 2016.
7. <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/paris-agreement-work-programme/katowice-climate-package>.
8. Christian de Perthuis et Raphaël Trotignon, *Le climat à quel prix ? La négociation climatique*, Odile Jacob, 2015, p. 108-110.
9. *State and Trends of Carbon Pricing 2019*, <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/31755>.



10. Martin L. Weitzman, « Internalizing the Climate Externality : Can a Uniform Price Commitment Help ? », *Economics of Energy & Environmental Policy*, vol. 4, n° 2, 2015, p. 37-50.
11. William Nordhaus, « Climate Clubs : Overcoming Free-riding in International Climate Policy », *The American Economic Review*, 105(4), 2015, p. 1339-1370.
12. Michael Keen, Ian Parry, Matt Davies et Victor Mylonas, « Fiscal Policies for Paris Climate Strategies. From Principle to Practice », IMF, mai 2019.
13. <https://www.clcouncil.org/media/EconomistsStatement.pdf>.
14. OCDE, « Historique de l'objectif de 0,7 % », *Journal du CAD 2002*, vol. 3, n° 4, 2002, p. 11-13 (révisé, juin 2010).
15. Noah S. Diffenbaugh et Marshall Burke, « Global warming has increased global economic inequality », *PNAS*, 14 mai 2019, vol. 116, n° 20, p. 9808-9813.
16. Jean Jouzel et Pierre Larrotourou, *Pour éviter le chaos climatique et financier*, op. cit.
17. Raphaël Olivier, *Prix interne du carbone : pourquoi et comment ?*, Chaire Économie du Climat, série « Information & débats », n° 55, 2018.
18. Olivier David Zerbib, « Is There a Green Bond Premium ? The yield differential between green and conventional bonds », *Working Paper*, University of Tilburg, 30 mai 2018.
19. Mark Carney, *Breaking the tragedy of the horizon*, 2015, <https://www.bankofengland.co.uk/speech>.
20. Michel Aglietta, Étienne Espagne et Baptiste Perrissin Fabert, *Une proposition pour financer l'investissement bas carbone en Europe*, note d'analyse du CEPII N°24, 2015.
21. Laurence Scialom, *La fascination de l'ogre, ou comment desserrer l'étau de la finance*, Fayard, 2019, p. 62-72.
22. Katheline Schubert, présidente, *L'impact de l'Accord Économique et Commercial Global entre l'Union européenne et le Canada (AECG/CETA) sur l'environnement, le climat et la santé*, rapport au Premier ministre, 7 septembre 2017, p. 4.

## CHAPITRE 12

1. ZEN = Zéro Émission nette.
2. Haut conseil pour le climat, *Rapport 2019*, <https://www.hautconseilclimat.fr/rapport-2019/>, p. 14.

3. Entreprises pour l'Environnement, *Imaginer et construire une France neutre en carbone*, mai 2019.
4. Jean Jouzel et al., *Le climat de la France au xx<sup>e</sup> siècle, tome IV : scénarios régionalisés*, ministère de l'Écologie et du Développement durable, *op.cit.*
5. <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/adaptation-france-au-changement-climatique>, consulté le 20/07/2019.
6. <http://vigilance.meteofrance.com>, consulté le 24/07/2019.
7. Christian de Boissieu (président), *Division par quatre des émissions de gaz à effet de serre de la France à l'horizon 2050*, Rapport du groupe de travail, La Documentation française, octobre 2006.
8. En particulier Loi POPE de 2005 sur la politique énergétique, loi dite « Grenelle 1 » de 2009, et Loi de 2015 sur la croissance verte.
9. <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/strategie-nationale-bas-carbone-snbc>.
10. <https://www.citepa.org/fr/activites/inventaires-des-emissions/secten>.
11. Haut conseil pour le climat, 2019, p. 28.
12. Haut conseil pour le climat, 2019, p. 15.
13. Civel, *The Red and the Green : essays on the economics of information in the sustainable habitat market*, *op. cit.*
14. Dominique Bureau, Fanny Henriot et Katheline Schubert, *Pour le climat : une taxe juste, pas juste une taxe*, Conseil d'analyse économique, note n° 50, 2019.
15. Comité pour la fiscalité écologique, sous la présidence de Christian de Perthuis, *Travaux du comité pour la fiscalité écologique. Rapport d'étape*, La Documentation française, juillet 2013, p. 36.
16. Comité pour la fiscalité écologique, *op. cit.*, p. 21-23.
17. Christian de Perthuis, « Comment réconcilier taxe carbone et pouvoir d'achat ? », *The Conversation*, 5 février 2019.
18. Simon Quemin et Raphaël Trotignon, « Marché carbone européen : les impacts de la réforme et de la réserve de stabilité à l'horizon 2030 », *Policy Brief*, Chaire Économie du Climat, mars 2018.
19. Pascal Canfin, Alain Grandjean et Gérard Mestrallet, « Propositions pour des prix du carbone alignés sur l'accord de Paris », Ministère de l'Écologie, juillet 2016.

## CONCLUSION

1. Ernst von Weizsäcker, « Factor Five: The Global Imperative », *op. cit.*, P.3.



2. Pierre-André Jouvét & Christian de Perthuis, *Le capital vert : une nouvelle perspective de croissance*, Odile Jacob, 2013.
3. Quentin Perrier & Philippe Quirion, How shifting investment towards low-carbon sectors impacts employment: Three determinants under scrutiny, *Energy Economics*, Volume 75, September 2018, P.464-483.
4. Yuval Noah Harari, *Sapiens. Une brève histoire de l'humanité*, op.cit., p. 408.
5. Serge Latouche, *La décroissance*, Éditions Que Sais-je ? 2019, P.87.
6. 2013, *La mystique de la croissance. Comment s'en libérer*, Flammarion.
7. Spinoza, *Éthique*, Livre IV, proposition LXVI, (traduction de Charle Appuhn), Garnier Flammarion, 1965, P.283.

Pour toute information sur notre fonds et les nouveautés dans votre domaine de spécialisation, consultez notre site web :

[www.deboecksuperieur.com](http://www.deboecksuperieur.com)

© De Boeck Supérieur s.a., 2019  
Rue du Bosquet, 7 – B-1348 Louvain-la-Neuve

EAN 978-2-8073-2298-1

Cette version numérique de l'ouvrage a été réalisée par [Nord Compo](#) pour De Boeck Supérieur. Nous vous remercions de respecter la propriété littéraire et artistique. Cette œuvre est protégée par le droit d'auteur et strictement réservée à l'usage privé du client. Toute reproduction ou diffusion au profit de tiers, à titre gratuit ou onéreux, de tout ou partie de cette œuvre, est strictement interdite et constitue une contrefaçon prévue par les articles L.335-2 et suivants du Code de la Propriété Intellectuelle. L'éditeur se réserve le droit de poursuivre toute atteinte à ses droits de propriété intellectuelle devant les juridictions civiles ou pénales.

« **Christian de Perthuis fait partie de ces chercheurs qui jouent à la perfection ce rôle de "passeur" entre la communauté des scientifiques et tous ceux qui désirent mieux comprendre le lien entre activités humaines et réchauffement climatique.** »

Jean Jouzel, climatologue, membre de l'académie des sciences, médaille d'or du CNRS (2002).

Le recours aux énergies fossiles a été à la source de la croissance du xx<sup>e</sup> siècle et de ses impacts sur la planète. La sortie du règne des fossiles sera la grande affaire du xxi<sup>e</sup> siècle. Cette transition énergétique a démarré, mais elle ne met pas nos sociétés à l'abri du risque climatique. En effet, son rythme n'est pas en phase avec le tic-tac de l'horloge climatique et elle ne permet pas de faire face à l'appauvrissement du milieu naturel qui réduit sa capacité d'absorption du CO<sub>2</sub>.

**Pour viser la neutralité carbone, il convient d'opérer une double mutation :** accélérer la transition énergétique en désinvestissant des actifs liés aux énergies fossiles et protéger les puits de carbone terrestres et océaniques en investissant dans la diversité du vivant. Il faut simultanément se préparer au durcissement des impacts du réchauffement, inévitables compte-tenu du trop-plein de gaz à effet de serre déjà accumulé dans l'atmosphère.

Au-delà des constats solidement documentés, la thèse de l'auteur est que **le changement climatique va contraindre nos sociétés à remettre en cause leurs modèles de croissance**. Pour opérer ces mutations, il convient d'introduire une tarification carbone à grande échelle et des normes contraignantes. Pour mobiliser l'action du plus grand nombre, ces nouvelles régulations devront répondre à des critères rigoureux de justice climatique.



Professeur d'économie à l'université Paris-Dauphine, **Christian de Perthuis** a dirigé la « Mission climat » de la Caisse des Dépôts, puis a fondé la Chaire Économie du Climat à l'université Paris-Dauphine. Il a conduit différentes missions pour les pouvoirs publics, dont la présidence du Comité pour la Fiscalité Écologique à l'origine de l'introduction d'une taxe carbone en France. Il est l'auteur d'une dizaine d'ouvrages, dont plusieurs ont fait l'objet d'une diffusion internationale.